

MASTER EN ENERGIA PER AL DESENVOLUPAMENT SOSTENIBLE

MASTER EN ENERGIA PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE



Universidad
Católica
"Nuestra Señora de la Asunción"



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA

MÒDUL 10 : PROJECTE FINAL DE MASTER
COORDINADOR : DANIEL GARCIA-ALMIÑANA

**Desarrollo de una embarcación turística ecológica
propulsada con energía solar fotovoltaica
- MEMORIA -**

Autor :
Carlos Jiménez

GRUPO G09/2009-ASU

Tutor :
Jean Claude Pulfer
Manel Ibáñez Planas

Presentación :
Terrassa, a 16 de Enero de 2010

Desarrollo de una embarcación propulsada con energía solar fotovoltaica

Máster: Energía para el desarrollo sostenible

Módulo 10: Proyecto final de Máster

Tutores: Jean-Claude Pulfer, Manel Ibáñez Plana

Coordinador: Daniel García Almiñana

Alumno: Carlos Jiménez Lao

Fecha: Enero de 2010

Índice

1. Definición del PFM.....	4
1.1 Introducción	4
1.2 Objeto.....	5
1.3 Justificación	5
1.4 Alcance	6
1.5 Especificaciones Básicas.....	6
Constructivos.....	7
Tecnológicos.....	7
2. Descriptiva de tecnologías implicadas.....	8
2.1 Tipos de embarcaciones.....	8
Monocasco	8
Catamarán	8
Trimarán	9
2.2 Embarcaciones existentes	9
Embarcación ECOSOL 33	9
Embarcación Solemar 30.....	10
Embarcación Sun 21 – Travesía transoceánica	10
2.3 Análisis de elementos.....	11
2.3.1 Elementos que componen la embarcación.....	11
2.3.2 Paneles solares fotovoltaicos	12
Célula monocristalina y multicristalina	12
Células de silicio amorfo.....	13
Células de lámina delgada (CIGS)	13
Células de lámina delgada CdTe.....	14
Dispositivos de optimización de energía.....	15
2.3.3 Acumuladores de baterías	16
Plomo Ácido	16
Baterías Alcalinas	18
Baterías de Litio- Ion	20
2.3.4 Motores eléctricos	22
Motores de corriente alterna.....	22
Motores de corriente continua	23
2.3.5 Regulación de motores.....	24
Regulación de motores AC	24
Regulación de motores DC.....	26

3. Enfoque de la resolución	28
3.1 Parámetros de diseño en la estructura de la embarcación	28
3.1.1 Tipo de embarcación	28
Dimensiones de la embarcación	29
Superficies de flotación	29
Peso del Casco	30
Peso estimado de la embarcación	31
Resistencia al avance.....	32
3.2 Sistemas de propulsión	34
3.2.1 Grupo de propulsión con un motor DC	35
Motor DC.....	35
Regulación DC.....	36
Grupo reductor.....	36
3.2.2 Elección del grupo de propulsión	37
Curvas características del motor	38
3.3 Generación de energía fotovoltaica	40
3.3.1 Superficie de captación	40
3.3.2 Conexión de los paneles fotovoltaicos.....	42
3.3.3 Radiación Solar	43
3.4 Almacenamiento y gestión de la energía	46
3.4.1 Procesos de carga.....	46
3.4.2 Dimensionado de las baterías	47
3.4.3 Tipos de baterías	48
Plomo ácido modular	49
Plomo ácido monoblock.....	49
Litio ion.....	50
3.4.4 Determinación del tipo de batería	51
4. Consideraciones ambientales y económicas	52
4.1 Consideraciones ambientales	52
4.1.1 Factores de impacto	52
Factores directos	52
Factores indirectos	52
4.1.2 Ahorro de emisiones de CO ₂	53
4.2 Consideraciones económicas	54
5. Conclusiones	55
6. Bibliografía y referencias	57

1. Definición del PFM

1.1 Introducción

Dada la particularidad del presente proyecto, realizado en Paraguay para su posterior presentación en España, se va a proceder a una breve descripción del contexto donde se va a desarrollar con el fin de dar a conocer que motivó su emprendimiento. En primer lugar se menciona donde será su futuro emplazamiento, el embalse de Itaipú.

Se trata de uno de los desarrollos tecnológicos de mayor envergadura que se han realizado en la historia del Paraguay. Está formado sobre el cauce de uno de los ríos más caudalosos del continente sudamericano, el Paraná. El emplazamiento del embalse está ubicado entre los departamentos de Alto Paraná de Paraguay y el estado de Paraná en Brasil.



La represa se construyó para albergar la mayor central hidroeléctrica del mundo, que hasta hoy no ha sido superada ni tan siquiera por la de las *Tres gargantas* (en cantidad de energía anual producida). Con una potencia nominal instalada de 14.000Mw tiene la capacidad de producir anualmente un promedio de 90.000Gwh.¹

La encargada de su explotación es la entidad Binacional Itaipú, ente empresarial compartido entre los países limítrofes Paraguay y Brasil. Sin embargo la gestión de sus recursos es independiente para ambas partes.

En el margen paraguayo, recientemente se creó el PTI² (*Parque tecnológico Itaipú*) que se gestiona de forma independiente a la entidad binacional Itaipú, pero recibe financiación por parte de esta. Se trata de un espacio con una componente educativa para dar a conocer nuevas tecnologías dentro de la región.

¹ http://www.itaipu.gov.br/index.php?q=es/node/72&foto=geracao_producao_ano_a_ano.jpg

² PTI. Parque tecnológico Itaipú. http://www.itaipu.gov.py/index.php?q=es/node/93&foto=pti_paraguail.jpg

Dentro del proyecto *PTI* se creó un espacio destinado a energías renovables, que en estos momentos se encuentra en su fase inicial. Para ponerlo en marcha, la entidad ofreció unas convocatorias para la financiación de proyectos relacionados con energías renovables con participación de todas las universidades dentro del territorio nacional.

Dichos proyectos, posteriormente pasarían a formar parte del *PTI* con el fin de la divulgar las energías renovables hasta ahora grandes desconocidas en la región.

El *CTA*³ de la Universidad católica de Asunción postuló ante este concurso obteniendo la concesión del presente proyecto de embarcación solar junto a la realización de una casa sustentable. De esta manera, el *CTA* se convierte en un centro pionero dentro del Paraguay.

El proyecto en concreto, consiste en el diseño de una embarcación eléctrica, alimentada por energía solar fotovoltaica, recibida de paneles instalados a bordo de la misma, un concepto de embarcación totalmente innovador en toda la región del *cono sur* de América Latina.

1.2 Objeto

Formar parte del primer grupo de proyectos que conforman el *PTI*, desarrollando el diseño de una embarcación ecológica propulsada con energía solar fotovoltaica.

El proyecto en sí, es la fase previa al desarrollo y construcción de la embarcación durante el año entrante 2010. Aquí la importancia de esta primera fase donde se definen parte de las bases del futuro proyecto ejecutivo.

La principal premisa del presente trabajo, es desarrollar una embarcación propulsada por energías limpias donde prime la eficiencia energética y la optimización de los recursos.

La futura aplicación de la embarcación es cubrir el servicio turístico dentro del embalse Itaipú, además de cumplir con la función de divulgación y promoción las energías renovables.

Su diseño será adaptado en primer lugar para realizar paseos turísticos a pequeños grupos de pasajeros, para la observación de fauna sobre el Lago de Itaipú.

1.3 Justificación

Antecedentes

Las embarcaciones propulsadas por motor térmico de combustión, además de ser una fuente de contaminación del aire y del agua de la zona, producen contaminación acústica.

Cuando se pretende utilizar una embarcación turística para navegar en aguas de reservas naturales, el ruido ocasionado por los motores resulta molesto, espantando a los animales y dificultando su avistamiento a corta distancia. La propulsión mediante motores eléctricos no presenta este inconveniente.

Utilidad

Al generar la energía eléctrica necesaria para navegar mediante paneles solares fotovoltaicos, en combinación con la energía acumulada en la dotación de baterías incorporadas a bordo de la embarcación, se puede circular con suficiente autonomía. Siempre dentro de los parámetros de potencia contemplados en el diseño.

³ *CTA*. Centro de investigación de la facultad de ciencia y tecnología de U.C.A. - <http://www.uca.edu.py/cta/>

Como argumento a favor de su funcionalidad, cabe mencionar, que normalmente los paseos turísticos se realizan en días soleados y no con mal tiempo. Favoreciendo la obtención de energía antes, durante y después de la navegación. Sin embargo, gracias a la energía acumulada en las baterías permite circular en ausencia de una radiación solar significativa.

Al formar parte de un parque tecnológico, tiene la utilidad adicional de ser un medio de divulgación que promueve la utilización de energías alternativas.

Teniendo en cuenta que actualmente Paraguay dispone de fuentes de generación de energía que ha permitido cumplir la demanda sin demasiados problemas, el hecho de que los visitantes puedan comprobar “in situ” una aplicación que utiliza otro tipo de energía, puede resultar una experiencia muy positiva.

Por último, una embarcación ecológica a energía solar será un atractivo turístico importante para la zona, contribuyendo al desarrollo de un turismo ecológico.

1.4 Alcance

A pesar de que el concepto de embarcación está enmarcado como un solo proyecto, se puede dividir en distintas áreas sujetas a desarrollo. De las que se hace mención a continuación.

Parámetros de diseño de la estructura de la embarcación

En primer lugar se describe brevemente, los diseños específicos de tecnologías de embarcaciones solares ya desarrolladas. Posteriormente se definen las dimensiones, peso y material de construcción de la embarcación a diseñar.

Sistema de propulsión

Consiste en realizar un análisis de las tecnologías disponibles, definir los tipos de controles disponibles y determinar el grupo de propulsión más adecuado.

Generación de energía

Se efectuará una búsqueda y análisis de los paneles solares que cubran la demanda energética de la embarcación. De acuerdo a esto se determinará la tecnología más adecuada.

Almacenamiento de energía

Del mismo modo que el apartado anterior, se investigarán las tecnologías disponibles para seleccionar el equipo que mejor se adapte a los requerimientos de acumulación de energía.

En conjunto, el alcance del trabajo es crear un anteproyecto que permita asentar las bases del diseño de la embarcación solar, dejando definidas las especificaciones básicas sobre las que se trabajará en vías futuras.

1.5 Especificaciones Básicas

Como se citó en un apartado previo, la finalidad de la embarcación es cubrir el servicio turístico. Desarrollando una embarcación propulsada por energías limpias donde prime la eficiencia energética y la optimización de los recursos.

Los primeros requisitos que demanda el promotor (PTI) es una embarcación con capacidad para 30 personas, capaz de circular a una velocidad moderada y tenga una autonomía aproximada de 3 a 4 horas con energía eléctrica. Adicionalmente dispondrá de un sistema alternativo para la propulsión de emergencia, éste será desarrollado en futuros proyectos

A partir de los requerimientos anteriores, se ha elaborado una base que conforma las especificaciones del prototipo que se va a diseñar.

Construcción de la embarcación	
Tipo de Casco	Catamarán o embarcación ligera
Material de construcción	Aluminio, Fibra de vidrio con madera o acero
Dimensiones aproximadas	
Largo	12 m
Ancho	4 m
Alto	3 a 4 m
Calado	En vacío 0.35m – Cargado 0.5m
Peso en vacío	4.5 Ton
Peso Cargado	6,5 a 7 Ton
Prestaciones	
Aforo	30 pasajeros
Tripulación	2 tripulantes
Velocidad de crucero	8 a 10 km/h
Velocidad máxima	12 a 15 km/h
Autonomía máxima	30 km
Datos del sistema de energía	
Generador Solar	8,1 kWp
Tensión de trabajo	72 V
Banco de Baterías	2 x 360 Ah – 72 V
Propulsión	2 motores eléctricos de 13kW (12 a 18 Hp)
Generador emergencia	2 generadores diesel de 6 kVA

A continuación se describen otros detalles de la embarcación que se consideran de interés.

Constructivos

- La cubierta superior de la embarcación que protegerá a los pasajeros y a la tripulación de la intemperie (sol y lluvia) será el alojamiento de los paneles solares fotovoltaicos.
- Las baterías de acumuladores se ubicarán en la parte inferior de la embarcación dentro del casco. De modo que queden apartadas del habitáculo donde viajan los pasajeros.
- Los motores irán alojados dentro del casco, quedando integrados en el interior de la embarcación.

Tecnológicos

- Las baterías serán de tipo estacionario de descarga con ciclo profundo. Para su elección se buscará un tipo de acumulador que tenga bajos niveles de mantenimiento y una buena relación peso/potencia. Se descartarán las tecnologías ambientalmente negativas⁴.
- Los motores contarán con un sistema electrónico de regulación, que permite variar su velocidad y ofrezcan la posibilidad de invertir el sentido de giro.
- En caso de necesidad, es decir con tiempo nublado y con uso prolongado de la embarcación, las baterías podrán ser cargadas mediante un cargador conectado a la red eléctrica, mientras que la embarcación se encuentra en el puerto.
- Si por algún motivo las fuentes eléctricas de energía se agotasen, dispone de un sistema de propulsión de emergencia mediante generadores eléctricos diesel.

⁴ Existen ciertas tecnologías, en las que su impacto ambiental a largo plazo puede ser muy negativo.

2. Descriptiva de tecnologías implicadas

2.1 Tipos de embarcaciones

El arte de navegar es una de las tecnologías más antiguas de la historia de la humanidad, en realidad no se poseen datos exactos sobre los primeros navegantes. Así que con este breve referente, es posible imaginar el número de desarrollos que el diseño de naval ha generado hasta hoy día. Entre todas las tecnologías de construcción naval se seleccionaron tres tipos, monocasco, catamarán y trimarán. A continuación se describe brevemente cuales son sus principales características

Monocasco

Es la base en el diseño naval, sobre la cual se sustenta la construcción de las primeras embarcaciones. Empleada en un enorme abanico de embarcaciones, desde botes ligeros, todo tipo de veleros, grandes cargueros, buques armados, barcas, etc.

Se caracteriza por estar formado de por un único casco. Tiene la ventaja de que su construcción es relativamente sencilla y más económica que en otros tipos de tecnologías. Por el contrario puede tener un escoraje⁵ considerable que merma las condiciones de confort de la embarcación, generando sensación de inestabilidad.



Puede considerarse como el modelo clásico de embarcación ampliamente probado, que actualmente sigue utilizándose, pese a ser mejorable en muchos aspectos.

Catamarán

Este tipo de construcción se basa en dos cascos paralelos que sustentan toda la superficie de la embarcación. Se caracteriza por tener una forma más afilada que mejora sus coeficientes hidrodinámicos. Todo ello hace que tenga menos desplazamiento⁶ que los de tipo monocasco. El resultado es que su resistencia al avance en el agua es notablemente inferior, pudiendo ser una embarcación más rápida y a su vez más eficiente.

En términos de estabilidad tiene muy buen comportamiento. Ya que al tratarse de dos flotadores colocados en los extremos del barco de forma longitudinal, eliminan los incómodos escorajes y mejoran el confort de sus pasajeros.

Un punto donde debe prestar atención, es la profundidad mínima por donde navegará. El catamarán tiene una superficie de flotación menor y en consecuencia mayor calado, teniendo más parte sumergida que una embarcación monocasco.



En definitiva. Al ofrecer menos resistencia al avance necesita menos energía para desplazarse, parámetro muy importante para diseños como el de la presente embarcación, donde prima la optimización de la energía consumida.

⁵ **Escoraje:** Movimiento lateral de la embarcación que en casos extremos puede provocar su vuelco.

⁶ **Desplazamiento:** Es el volumen de la embarcación multiplicado por un peso específico del fluido donde flota. Es decir, el peso del agua desplazada con el hecho de flotar. Fuente: Fondear.com

Trimarán

Tecnología menos común que vendría a ser una combinación de monocasco y catamarán.

Formado por un casco central con dos patines laterales, menos sumergidos que en el catamarán, que realizan la función de equilibrar la embarcación en el agua en determinadas maniobras.

Es apropiado para diseños muy dinámicos, que alcancen altas velocidades y requieran de un gran control en la estabilidad de la embarcación. Por ello, su elección debe estar bien justificada, ya que esta complejidad supone un incremento en el coste de fabricación.



2.2 Embarcaciones existentes

Como ya se ha mencionado con anterioridad, este tipo de embarcaciones ya ha sido creada por distintos constructores navales, por ello se van a mostrar algunos de los diseños ya existentes con sus principales características.

Embarcación ECOSOL 33

La siguiente embarcación es un producto de la empresa alemana *Kopf Solarschiff GmbH*, especializada en el desarrollo y fabricación de barcos solares. Dispone de una amplia gama de modelos y tamaños, que cubren un amplio rango de prestaciones.

El modelo ECOSOL 33, es el referente de diseño para el presente proyecto. Se trata de una embarcación ligera de tipo catamarán construida en aluminio. El equipo de propulsión, lo conforman dos motores eléctricos de corriente continua alimentados por dos bancos de baterías independientes.

Su generador solar permite cubrir un máximo del 8% de la energía requerida por el sistema de propulsión a valores de plena carga, lo que hace pensar que dispone de un medio auxiliar de alimentación, o bien está diseñada para navegar con una carga previa de las baterías a través de la una red eléctrica fija.

Technical details - ECOSOL 33

Length/Beam/Height	approx. 10,00 m/3,00 m/3,30 m
Draught unloaded/loaded	approx. 0,50/0,60 m
Passengers incl. crew	max. 25
Cruising speed	8 km/h
Max. speed	approx. 12 km/h
Range	approx. 60 km
Weight empty	approx. 5,8 to
Solar-generator	approx. 1,45 kWp
Batteries	2 x 330 Ah, 48 Volt
Drives	2 x 10 kW Motors



Figura 2.1 – Embarcación solar Kopf ECOSOL33⁷

Dentro de la página web del fabricante existen diferentes tipos de embarcaciones de prestaciones muy variadas, que demuestran la viabilidad de este tipo de tecnología.

⁷ <http://www.kopf-solarschiff.de/index.php?id=73&L=1>

Embarcación Solemar 30

Es una embarcación similar a la anterior pero de prestaciones más modestas. El promotor de su desarrollo, ha sido el *centro tecnológico electrosolar de las islas Baleares* (España), en conjunto con la empresa de construcción naval *Seacleaner Trawler S.A.*

Tiene una velocidad de crucero de 3 nudos⁸ (5,5 km/h), y utiliza dos motores de corriente continua de baja potencia. Para este modelo, el generador solar puede cubrir hasta el 60% de la demanda total de energía del sistema de propulsión trabajando a máxima potencia. Por lo que se puede considerar una embarcación que realmente se sustenta a través de la energía solar fotovoltaica.

Emplea unas baterías de plomo-ácido con electrolito de gel. No definen una autonomía mínima pero suponemos que es baja, ya que está destinado para paseos dentro de un estanque ubicado en un casco urbano, siendo su principal finalidad la divulgación de EERR's.

En la siguiente ilustración se menciona de forma breve sus principales características técnicas.



Figura 2.2 – Embarcación solar Seacleaner – Solemar 30⁹

Embarcación Sun 21 – Travesía transoceánica

Este modelo fue desarrollado por una compañía suiza especializada en embarcaciones solares. Cruza el atlántico desde Sevilla hasta Miami solamente utilizando energía solar. El trayecto lo hizo en un periodo de 117 días, su velocidad de crucero fue de 5,5 nudos (10km/h).

Se ha elegido este barco, porque es la muestra palpable de la viabilidad de un barco solar con una alimentación 100% solar. Sin ningún motor híbrido de apoyo ni ninguna carga auxiliar.

El único dato técnico disponible es sobre su generador solar. Está compuesto por 48 paneles fotovoltaicos monocristalinos que entregan una potencia aproximada de 9,6kWp, capaces de alimentarlo prácticamente sin interrupciones.



Figura 2.3 - Embarcación Transatlántica Sun21¹⁰

⁸ Un nudo equivale a 1.85km/h

⁹ http://www.seacleaner.com/pdfs/Solemar_es.pdf

¹⁰ <http://www.transatlantic21.org/boat/>

2.3 Análisis de elementos

2.3.1 Elementos que componen la embarcación

A continuación se muestran los elementos que forman parte del sistema de generación, gestión y aplicación de la energía que proporcionan la fuerza motriz que requiere la embarcación. En el siguiente esquema se representa gráficamente cómo interactúan dentro del proceso.

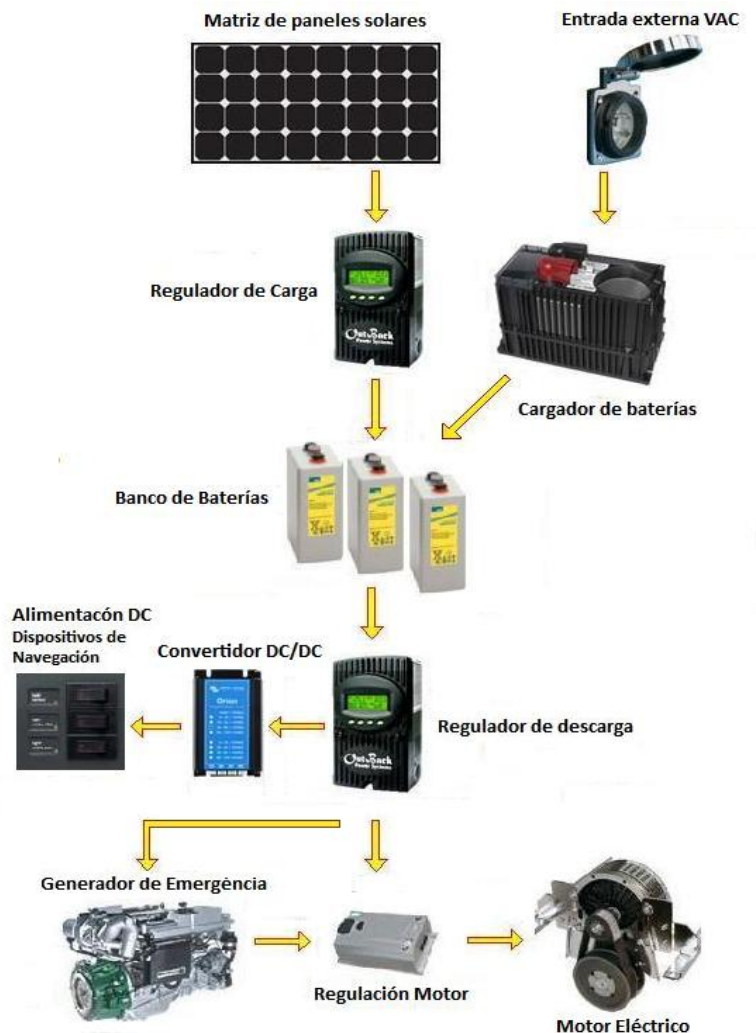


Figura 2.4 - Esquema de componentes de la embarcación solar¹¹

A continuación se procede a una descripción de las tecnologías disponibles para elementos de la embarcación. La estructura del documento se ha orientado sobre las siguientes áreas:

- Paneles solares fotovoltaicos
- Acumuladores de baterías
- Motores eléctricos
- Regulación de motores

Dentro del desarrollo de la información obtenida en la fase de investigación, por disponibilidad de recursos no ha sido posible el análisis profundo de todas las tecnologías. Por ello se aplicó un criterio de selección que acote las posibilidades que mejor se adecuan al proyecto.

¹¹ Fuente: Elaboración propia

2.3.2 Paneles solares fotovoltaicos

Buena parte de la energía que alimenta la embarcación se recibe desde los módulos fotovoltaicos ubicados en su cubierta. A continuación se exponen las tecnologías más adecuadas para el presente diseño, además de otras de utilización menos extendida.

Entre las tecnologías de células fotovoltaicas de uso comercial, sus diferencias fundamentales radican en el material semiconductor y su proceso de fabricación a modo resumen, se exponen en la siguiente tabla.

En función de la tecnología de construcción	
Monocristalina - Multicristalina	
Lámina delgada	

En función del material utilizado	
Silicio	Si
Arseniuro de Galio	AsGa
Teluro de Cadmio	CdTe
Cobre-Indio-Selenio	CuInSe ₂
Cobre(Indio-Galio)Selenio	Cu(InGa)Se ₂

Figura 2.5 – Tecnologías y materiales en células fotovoltaicas¹²

Para comprender los diferentes tipos de tecnologías se va a explicar de una forma resumida los tipos de célula y su proceso de fabricación.

Célula monocristalina y multicristalina

Es el tipo de tecnología actualmente mas empleado. Debido a ello se han optimizado sus procesos de producción, que la convierten en una tecnología fiable, con un rendimiento razonable a precios competitivos.

Como materia prima se suelen utilizar el silicio cristalino como material semiconductor. Su proceso de fabricación se puede dividir en cuatro fases: Obtención y purificación del material semiconductor, crecimiento del cristal, corte del material en obleas y montaje de la célula.

El silicio es obtenido a partir de minerales formados principalmente por SiO₂. En el primer proceso se obtiene con una pureza aproximada del 99%, insuficiente para el uso como semiconductor, por lo que posteriormente debe someterse a procesos químicos que disminuyan los niveles de impurezas a valores aceptables, del orden de 10ppm.

La etapa de crecimiento del cristal, es el proceso donde el silicio se solidifica a partir de una semilla de crecimiento. De los varios procedimientos existentes, el método *Czochralsky* suele ser el más utilizado, donde el producto de silicio resultante, se da en forma de lingotes.

Se obtienen dos tipos de estructuras: la monocristalina (con un único frente de cristalización) y multicristalina (con varios frentes). La obtención de una u otra estructura depende del grado de pureza del silicio durante la etapa de crecimiento. La diferencia entre ambos al final del proceso, se traduce en un rendimiento ligeramente inferior para el lingote multicristalino.

Cortando el lingote en láminas de 2 a 4 mm de espesor se obtienen las obleas, que son sometidas a un proceso de decapado para eliminar defectos aparecidos durante el corte.

¹² Fuente: Elaboración propia

Por último se forma la una unión PN mediante la adhesión de dos obleas de distinto tipo de semiconductor, se insertan los contactos metálicos y finalmente, se conectan las celdas en serie para alcanzar los niveles de tensión y potencia requerida.

Se puede apreciar que la obtención de paneles cristalinos es un proceso complejo, largo y laborioso; ahí el coste elevado de los módulos. Sin embargo, existen otro tipo células fotovoltaicas como las de lámina delgada, que emplean técnicas de fabricación más simples, brindando la posibilidad de producir a costes más competitivos.

Células de silicio amorfo

Formadas por un compuesto de silicio con hidrógeno, su proceso de fabricación es menos complejo que el cristalino. El material semiconductor se deposita sobre sustratos como el vidrio, acero inoxidable o polímeros, ofreciendo gran versatilidad para su fabricación en serie.

El proceso de fabricación se efectúa dentro de una cámara de vacío, donde se continuamente se aplica un flujo de gas silano, mezclado eventualmente con otros gases. Se aplica una descarga de radiofrecuencia y el silano (SiH_4) se descompone en forma de plasma, produciendo un depósito de silicio amorfo hidrogenado (a-Si: H) sobre las superficies sólidas que están en contacto con él. Las células se obtienen en forma de láminas depositadas sobre los sustratos colocados en el interior de la cámara.

Tienen mejor comportamiento con radiación difusa, lo que supone una generación más equilibrada en latitudes con una radiación solar que no sea constante. Otra ventaja es que su sensibilidad ante la temperatura es menor que en módulos cristalinos.

Por el contrario su rendimiento global es notablemente inferior, necesitando mayores superficies de captación para generar la misma energía que lo harían los de silicio cristalino

Células de lámina delgada (CIGS)

Utilizan una tecnología similar a la de silicio amorfo pero están formadas por materiales con mejores rendimientos de generación eléctrica. En concreto son una combinación de Cobre, Indio, Galio y Selenio. Utilizan dos métodos de fabricación: Evaporación a una etapa a alta temperatura, o dos etapas con diferentes temperatura.

El primer método denominado coevaporación en vacío. Gasifica todos los elementos, Cu, In, Ga y Se, y los deposita en el sustrato simultáneamente a temperaturas de 400 a 600°C, formando la lámina de Cu(InGa)Se_2 en un solo proceso de crecimiento.

El otro proceso se divide en dos fases, separando la entrada de los metales y conseguir productos de más alta calidad. Donde Cu, Ga e In se depositan con un procedimiento de bajo coste y baja temperatura, para posteriormente someter al conjunto a una atmósfera de Selenio, a temperaturas de 400-600°C. El resultado final, son láminas de mayor rendimiento.

Los sustratos suelen ser de vidrio cal-soda, poliamida, titanio o acero. Estos últimos son conductores, lo que permite la fabricación directa de módulos, sin tener que fabricar las células y ensamblarlas en módulos. Para interconectarlos, se realiza un corte laser en el sustrato y posteriormente se fabrican los contactos eléctricos.

Los mejores módulos de Cu(InGa)Se_2 tienen eficiencias similares a los módulos de silicio cristalino con costes de fabricación notablemente inferiores. Esta ventaja, viene dada a que los

procesos de deposición se pueden realizar por lotes, en los cuales un número determinado de placas de sustrato son procesadas en paralelo, o de forma continua.

Células de lámina delgada CdTe

Las células de lámina delgada de telurio de cadmio son la base de la tecnología con mayor impacto comercial en la producción de energía solar. Tienen una gran estabilidad, un diseño competitivo y las características necesarias para producirse a gran escala.

Emplea diferentes métodos para sus procesos de fabricación, siendo similares al resto de tecnologías de lámina delgada pero con ciertas peculiaridades. Cabe destacar, el tratamiento de la superficie posterior de la célula fin de garantizar un contacto eléctrico óptimo.

Ya que sería demasiado extenso para detallar todos los procesos, únicamente se citan los métodos de fabricación específicos para esta tecnología. Estos son, el crecimiento epitaxial, capas átomo por átomo, electro-depósito, evaporación y ablación láser.

Una de las particularidad de este tipo de célula es que utiliza una sustrato de vidrio llamado ventana, sobre el que está depositado el CdTe y realizando el contacto óhmico posterior.

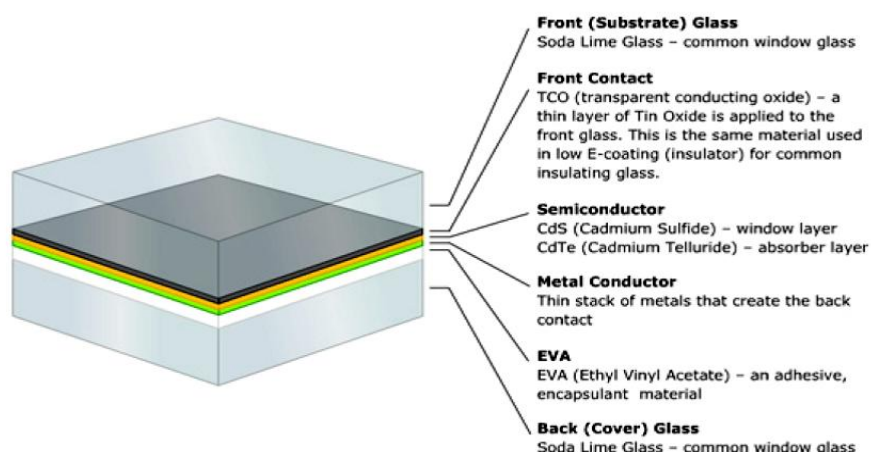


Figura 2.6 – Esquema de una célula de CdTe FV¹³

En la siguiente tabla se muestran a modo resumen los rendimientos de los diferentes tipos de tecnologías y materiales empleados en la elaboración de células fotovoltaicas.

Tecnología de fabricación	Material	Rendimiento Laboratorio	Rendimiento comercial
Monocristalina	Si	21%	14%
Multicristalina	Si	19%	13%
Lámina delgada	CIGS	18%	12%
	Cd-Te	16%	9%
	a -Si	12%	7%

Figura 2.7 – Eficiencias células FV¹⁴

La información adicional sobre las tecnologías y usos de células fotovoltaicas se encuentra en la bibliografía consultada.

¹³ Fuente: Material del Máster – Módulo 5 “Tecnologías de fabricación FV”

¹⁴ Fuente: Elaboración propia

Dispositivos de optimización de energía.

Como información complementaria a los tipos de paneles que existen, se hace una breve mención sobre dispositivos que optimizan su rendimiento.

En la mayoría de instalaciones fotovoltaicas, para optimizar el rendimiento del sistema se requiere un regulador electrónico instalado entre la salida del panel y la carga, denominado seguidor del punto de máxima potencia (MPPT).

Su principio de funcionamiento se basa en la conexión indirecta entre la salida del panel solar y la entrada de la carga. A través de un convertidor cc /cc, se adaptan los niveles de tensión de salida del panel fotovoltaico a los que requiere cada elemento alimentado. Con ello, se podrá trabajar a la máxima potencia cumpliendo el objetivo de generar la máxima cantidad de energía a partir de la radiación solar disponible, independientemente de la tensión de la carga.

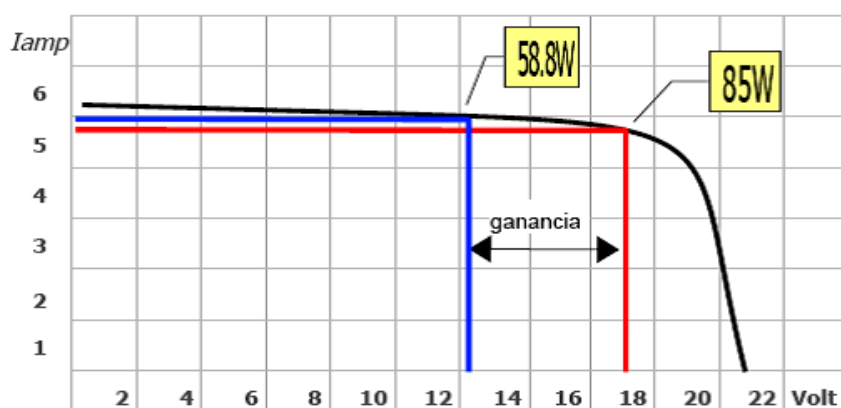


Figura 2.8 – Curva de máxima potencia del panel solar BP585¹⁵

Como se puede observar en el gráfico; el nivel de máxima potencia se encuentra en el punto donde el producto Tensión-Intensidad es mayor.

A partir de modelizaciones matemáticas, se comparan valores de tensión e intensidad tomados de la curva característica del panel fotovoltaico de referencia. Con ello es posible conocer sus puntos óptimos de generación de energía.

También puede hacerlo mediante el control de variables como la irradiación solar y la temperatura del panel, pero no es un método tan común.

En términos puramente energéticos se puede considerar que el conversor tiene ciertas pérdidas en su operación. De todos modos la eficiencia global del sistema mejorará respecto a instalaciones que carezcan de este elemento.

¹⁵ Panel solar BP585: Voc 22v Isc 5,1 A / Vmpp 17,6v Impp 4,72A - <http://www.soltermia.org/T80%20esp.pdf>

2.3.3 Acumuladores de baterías

Actualmente existe una gran variedad de tecnologías dentro del campo de la acumulación de energía, con una multitud de posibilidades a nivel de prestaciones, aplicación y calidad.

Desde el punto de vista de aplicación, las baterías se pueden dividir en tres tipos.

- Arranque
- Tracción
- Estacionarias

El primer tipo permite entregar una gran cantidad de energía durante un tiempo muy corto sin tolerar descargas profundas, su aplicación típica es para el arranque en automóviles.

Las de tracción, son especialmente diseñadas para vehículos eléctricos. Tienen más tolerancia a descargas profundas durante periodos más largos, pero pueden someterse a puntuales demandas donde se entrega la energía en tiempos relativamente cortos.

Y por último las de tipo estacionario. Generalmente están destinadas a acumulación fotovoltaica. Permiten entregar la energía de una forma progresiva durante un largo periodo de tiempo y toleran profundidades de descarga importantes.

Vinculando las necesidades del proyecto con el tipo de batería, se define una tecnología a medio camino entre tracción y estacionaria. La embarcación es un vehículo eléctrico con ciertas particularidades, donde puede haber periodos de carga similares a las de una instalación fotovoltaica.

Desde un punto de vista de tecnología de fabricación empleada, las más usuales se pueden clasificar en los siguientes tipos:

- Plomo ácido
- Alcalinas
- Litio Ion

A continuación se procede a la descriptiva de cada tecnología, sus características destacadas y los tipos que engloba cada uno de ellas.

Plomo Ácido

De un modo breve e introductorio, mencionar que las baterías de tipo plomo-ácido fueron las primeras baterías de acumulación de energía eléctrica que se fabricaron. El investigador Gastón Planté a mediados del siglo XIX descubrió que sumergiendo unos electrodos de plomo dentro de una solución de ácido sulfúrico, podía obtener energía eléctrica a partir de la reacción química de los materiales, siendo este proceso reversible. Pese a su antigüedad, hoy día siguen utilizándose.

Sigue abarcando una parte importante del sector de acumulación de energía eléctrica. La principal razón, se debe a que los materiales empleados en su fabricación son más accesibles que en otras tecnologías y sus tecnologías de construcción son más sencillas. Además de ser una tecnología muy experimentada que ya ha sido ampliamente probada.

Sin embargo, no todos son ventajas. La dependencia de su vida útil ante la profundidad de descarga es muy desfavorable (ver Fig2.9). Los ciclos útiles de la batería disminuyen proporcionalmente con la profundidad de descarga a la que se le someten.

Otro inconveniente es su baja densidad energética, parámetro esencial para aplicaciones en las que el peso de la batería sea determinante.

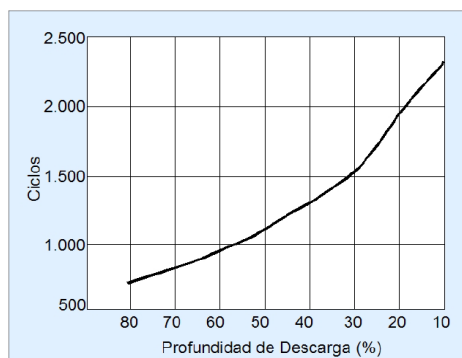


Figura 2.9 - Relación ciclos de vida frente a la profundidad de descarga en baterías de Pb-Ad¹⁶.

Su principio de funcionamiento mantiene el concepto de la batería original, aunque se han desarrollado modificaciones importantes en las diferentes tecnologías de construcción y el tipo de electrolito empleado. Se pueden clasificar en los siguientes tipos:

Con electrolito líquido / Húmedas

La opción más simple dentro de las baterías de plomo ácido. El electrolito se encuentra en estado líquido en contacto con los electrodos metálicos. Sus prestaciones son limitadas.

Tiene el inconveniente de la sulfatación. Que consiste en pérdidas sufridas por emisión de gases (H_2 y O_2) hecho que requiere un mantenimiento para reponer esa agua evaporada.

Con electrolito en gel / Secas

La principal diferencia respecto a la anterior, es que su electrolito tiene un compuesto añadido: dióxido de silicio (SiO_2), éste lo gelifica dándole una consistencia menos líquida.

Generalmente están selladas, así que no dejan salir los gases derivados de la gasificación la operación de la batería. Para compensar la pérdida de agua del electrolito, existe un proceso químico que combina los gases de hidrógeno y oxígeno volviéndolos a convertir en agua. Así solucionan el problema de pérdida de agua y no se requiere ningún mantenimiento.

Otra característica es que para paliar un posible aumento de presión ocasionado por los gases dentro de la batería, se incorporan unas válvulas de seguridad que liberan este exceso en caso de que se supere un valor máximo determinado por el propio fabricante.

AGM (Absorbed Glass Mat)

Se puede considerar como una combinación de las tecnologías mencionadas. El electrolito se deposita en una rejilla de fibra de vidrio absorbente. Dicha rejilla se ubica entre los electrodos positivo y negativo de la celda. Así funciona como electrolito líquido, con las ventajas de la batería seca. Están selladas, por lo que no requieren mantenimiento durante su vida útil.

En conclusión, las baterías de Pb-Ad son óptimas para ciertas instalaciones, en las que no es importante demasiado su peso y dimensiones, y en configuraciones que permitan evitar profundidades de descarga demasiado altas para no comprometer su vida útil.

¹⁶ Fuente: Material del Máster – Módulo 5 “Componentes de un sistema fotovoltaico”

Baterías Alcalinas

Denominadas alcalinas por los tipos de metal que las componen. Su tecnología mantiene el concepto de las baterías plomo-ácido. Es decir, un electrodo positivo y otro negativo sumergidos en un electrolito, con la diferencia en los tipos de materiales utilizado.

Los primeros modelos eran en baterías domésticas de poca potencia para pequeños dispositivos electrónicos, hasta evolucionar a modelos de uso industrial.

Níquel- Cadmio

Es un modelo muy experimentado dentro de las baterías alcalinas. Se compone por dos tipos de metales. Hidróxido de níquel en el ánodo y un compuesto de cadmio para el cátodo. En la composición del electrolito suele utilizarse hidróxido de potasio (metal alcalino)

Esta tecnología presenta grandes ventajas respecto a las de plomo. Destacando los puntos:

- Mayor profundidad de descarga, sin verse tan afectada por la tecnología de plomo.
- Debido al tipo de material utilizado fabricación, no se ven afectadas por la corrosión ni la sulfatación. Esto implica su mayor vida útil y un envejecimiento lineal y predecible.
- Soportan un rango más amplio de temperaturas
- Su densidad energética es mayor, aunque los niveles de tensión que entrega son inferiores, por lo que la diferencia no es tan notable.

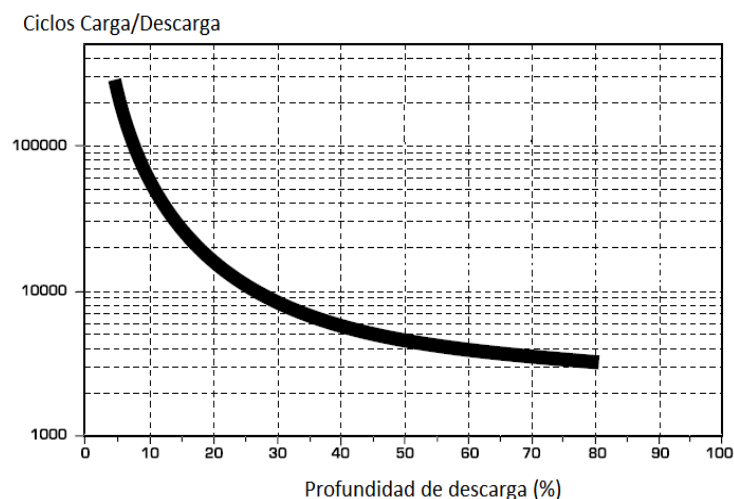


Figura 2.10 - Relación ciclos de vida frente a la profundidad de descarga en baterías de Ni-Cd ¹⁷.

Pese a ser una batería con buenas prestaciones, tiene sus inconvenientes

- Sigue teniendo un coste más elevado que las de Pb-Ad, (a pesar de mas vida útil)
- Sufren el conocido efecto memoria que merma su capacidad de acumulación.
- La toxicidad de los metales empleados en su fabricación.

El cadmio es un metal con un alto poder contaminante muy difícil de reciclar, al cual si no se le aplica una correcta disposición en celdas de seguridad, puede ocasionar graves problemas ambientales. Esta característica se ha considerado un aspecto muy negativo, dejando la tecnología en términos obsoletos que desaconsejan su utilización.

¹⁷ Fuente: <http://saftbatbatteries.com>

Níquel- Hidruro metálico

Es una evolución de su homóloga de cadmio pero con la principal ventaja de que su toxicidad es mucho más baja. Utilizan la misma tecnología con la diferencia de que el material que compone el cátodo no está compuesto por cadmio, sino por una aleación de hidruro metálico.

El uso de este tipo de batería fue muy popular para el uso en vehículos eléctricos híbridos, hasta la aparición de nuevas tecnologías. Esta tipo de batería ha sido la que incorporaba el modelo Toyota Prius¹⁸, uno de los modelos híbridos más vendidos de la historia.



Figura 2.11 – Baterías de Ni-MH Utilizadas en un vehículo híbrido¹⁹

Las características destacables a favor de este tipo de batería son las siguientes:

- Mayor densidad energética (40% más que la de Ni-Cd,)
- Prácticamente no tiene efecto memoria
- No posee metales tan tóxicos por lo que es un gran beneficio medioambiental

Como puntos en contra se menciona

- Su vida útil es notablemente inferior. Factor que afecta negativamente en el balance económico de la misma.
- Tiene una tasa de autodescarga bastante alta, cerca de un 30% por mes.

Por último mencionar, que la resistencia interna de este tipo de batería en algunos casos es más del doble que la de Ni-Cd, factor negativo para ciertas aplicaciones de potencia.

¹⁸ Fuente: http://www.toyota.co.jp/Museum/data_e/a03_18_1.html#1

¹⁹ Fuente: <http://www.batteryuniversity.com/parttwo-40a.htm>

Baterías de Litio- Ion

Inicialmente fueron baterías de pequeño tamaño, siendo empleadas únicamente para aplicaciones de poca potencia. Aunque actualmente se siguen cumpliendo dicha función en pequeños dispositivos electrónicos como teléfonos móviles y ordenadores portátiles, se han desarrollado varias tecnologías de baterías que se utilizan para aplicaciones de mayor demanda de energía como la acumulación en vehículos eléctricos.

La tecnología de las baterías Li-Ion se basa en utilizar un ánodo de grafito sobre el cual se intercalan iones de litio. Posteriormente estos iones fluyen hacia el polo opuesto a través del electrolito de sales de litio contenidas en una fibra porosa. Su cátodo está compuesto por óxido de cobalto, de manganeso o fosfato. Dependiendo de estos últimos materiales, las prestaciones de la batería pueden variar notablemente.

Su nivel de desarrollo ha permitido la obtención de una batería con grandes ventajas, éstas se resumen a continuación:

- En términos de tensión, genera el equivalente a tres baterías de tipo alcalino.
- Tiene el mejor valor de densidad energética. Del orden de 90 hasta 190Wh/Kg²⁰
- Poseen cantidades de metales contaminantes notablemente inferior
- La entrega de energía es muy lineal (es independiente del nivel de carga de la batería)

A modo resumen, se presenta la siguiente tabla las diferentes tecnologías de Li-Ion.

Chemistry	Nominal V	Charge V limit	Energy density Wh/kg	Applications	Note
Cobalt	3.60V	4.20V	110-190	Cell phone, cameras, laptops	Since 1990s, most commonly used for portable devices; has high energy density.
Manganese (spinel)	3.7-3.80V	4.20V	110-120	Power tools, medical equipment	Low internal resistance; offers high current rate and fast charging but lower energy density.
Phosphate	3.2-3.30V	3.60V*	95-140	Power tools, medical equipment	New, high current rate, long cycle life. Higher charge V increase capacity but shorten cycle life.

Figura 2.12 – Características principales de diferentes tipos de tecnología de Li-Ion²¹.

Es una batería con excelentes prestaciones, pero mucho más compleja, por lo que se debe tener especial atención en los siguientes factores:

- Evitar sobrecargas ya que puede resultar muy peligroso (inflamación). Cuando se conecten en bancos de baterías en serie o paralelo, se recomiendan circuitos electrónicos de protección que realicen un control preciso sobre valores máximos de tensión e intensidad durante los procesos de carga y descarga.
- Otro factor negativo es la baja tolerancia a niveles extremos y cambios bruscos de temperatura. Puede resultar un factor muy limitante para cierto tipo de instalación.
- Su coste sigue siendo elevado, del orden de tres veces superior a las de plomo ácido.

Por último concluir, que pese a ciertas desventajas este tipo de tecnología ha llegado a niveles muy competitivos para ser utilizada como acumuladores de tracción.

²⁰ En la tecnología de Li-Ion Cobalto (Utilizada para pequeños aparatos)

²¹ Fuente: <http://www.batteryuniversity.com/partone-5A.htm>

En esta última parte del apartado, se presenta una tabla comparativa, que muestra de un modo más gráfico las diferencia entre los tipos de tecnología presentadas.

	Nickel-cadmium	Nickel-metal-hydride	Lead-acid sealed	Lithium-ion cobalt	Lithium-ion manganese	Lithium-ion phosphate
Gravimetric Energy Density (Wh/kg)	45-80	60-120	30-50	150 - 190	100 - 135	90 - 120
Internal Resistance in mΩ	100 to 200 ¹ 6V pack	200 to 300 ¹ 6V pack	<100 ¹ 12V pack	150 - 300 ¹ pack 100 - 130 per cell	25 - 75 ² per cell	25 - 50 ² per cell
Cycle Life (to 80% of initial capacity)	1500 ²	300 to 500 ^{3,4}	200 to 300 ³	300 - 500 ³	Better than 300 - 500 ⁴	>1000 lab conditions
Fast Charge Time	1h typical	2 to 4h	8 to 16h	1.5 - 3h	1h or less	1h or less
Overcharge Tolerance	moderate	low	high	Low. Cannot tolerate trickle charge.		
Self-discharge / Month (room temperature)	20% ⁵	30% ⁵	5%	<10% ⁵		
Cell Voltage Nominal Average	1.25V ⁷	1.25V ⁷	2V	3.6V 3.7V ⁶	Nominal 3.6V Average 3.8V ⁶	3.3V
Load Current peak best result	20C 1C	5C 0.5C or lower	5C ⁹ 0.2C	<3C 1C or lower	>30C 10C or lower	>30C 10C or lower
Operating Temperature ¹⁰ (discharge only)	-40 to 60°C	-20 to 60°C	-20 to 60°C	-20 to 60°C		
Maintenance Requirement	30 to 60 days	60 to 90 days	3 to 6 months ¹¹	not required		
Safety	Thermally stable, fuse recommended	Thermally stable, fuse recommended	Thermally stable	Protection circuit mandatory; stable to 150°C	Protection circuit recommended; stable to 250°C	Protection circuit recommended; stable to 250°C
Commercial use since	1950	1990	1970	1991	1996	2006
Toxicity	Highly toxic, harmful to environment	Relatively low toxicity, should be recycled	Toxic lead and acids, harmful to environment	Low toxicity, can be disposed in small quantities		

Figura 2.13 - Comparativa de características de los tipos de baterías²²

Por último, mostrar las densidades energéticas medias de las diferentes tecnologías.

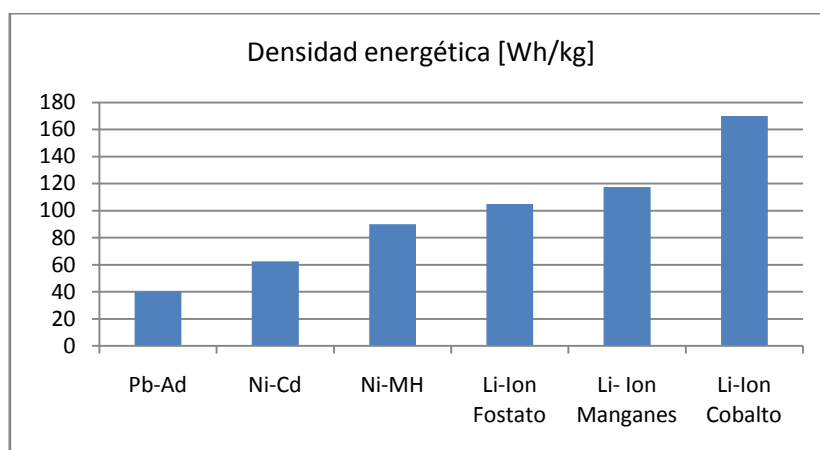


Figura 2.14 - Densidad Energética media de los diferentes tipos de baterías²³

²² Fuente: <http://www.batteryuniversity.com/partone-3.htm>

²³ Fuente: Elaboración propia

2.3.4 Motores eléctricos

El sistema de propulsión es una de las bases en el diseño de la embarcación. Teniendo consciencia de ello, de forma resumida se hará reseña sobre las alternativas disponibles.

Entre los diferentes tipos de motores se pueden clasificar en los de corriente alterna y los de corriente continua, y dentro de estos, existe un abanico de posibilidades muy amplio, en función de la aplicación del motor, rango de potencia, necesidad de regulación, etc.

Motores de corriente alterna

Su principio de funcionamiento está basado en las leyes del electromagnetismo, donde se establece una relación del campo magnético giratorio creado en el estator²⁴ con el campo inducido en el rotor²⁵. Para facilitar su comprensión se muestra la siguiente secuencia.

1. Se aplica una corriente eléctrica en el bobinado del estator
2. Esta corriente eléctrica genera un campo magnético en el propio estator
3. Dicho campo magnético induce una corriente en el bobinado del rotor
4. Estas corrientes generan una fuerza electromotriz que lo hacen girar

Motor asíncrono

En primer lugar, mencionar que esta tecnología es la más sencilla en la construcción de motores. Aunque inicialmente fue diseñado para trabajar a velocidades y cargas constantes acepta variaciones en su régimen de giro.

La denominación asíncrona viene dada, a que la velocidad del campo magnético giratorio del estator no corresponde con la del rotor. A este desfase de velocidades se le denomina deslizamiento. La velocidad de giro de un motor asíncrono es igual a la velocidad del campo magnético menos el deslizamiento del rotor.

Dependiendo del tipo de construcción de su rotor, se pueden dividir en dos tipos.

- Rotor bobinado o anillos rozantes
- Rotor de jaula de ardilla.

El primer tipo, utiliza un rotor que aloja un bobinado eléctrico alimentado mediante unas escobillas. Mientras que el rotor de jaula es un bloque compacto que lleva encastadas unas barras de cobre o aluminio que cumplen la función de circuito magnético.

A nivel funcional, se diferencian en que los de rotor bobinado permiten la regulación eléctrica mediante la modificación del valor de unas resistencias externas, con ello se puede modificar el par de arranque. Por ello el de rotor bobinado tiene una cierta flexibilidad en cuanto a sus características eléctricas. En cambio, el de jaula de ardilla no permite ninguna modificación.

A pesar de todo, con los controles de motores disponibles actualmente es más conveniente utilizar uno de jaula de ardilla, ya que no requiere ningún tipo de mantenimiento eléctrico, es más robusto y su construcción es más simple y en consecuencia más económica.

El par motor depende directamente de las corrientes del rotor, que en el arranque son muy elevadas y disminuyen a medida que aumenta la velocidad (par de arranque y par normal).

²⁴ *Estator*: Es la parte estática del motor a la que también se le puede denominar inductor

²⁵ *Rotor*: Parte móvil giratoria del motor a la que también se le puede denominar inducido

Motor síncrono

Su principio básico de funcionamiento que los diferencia de los de tipo asíncrono, es que requieren una excitación eléctrica en el bobinado de su rotor para generar movimiento. Es decir, la corriente de alimentación del bobinado del estator más la que excita el rotor.

La característica síncrona, viene dada porque la velocidad de giro del rotor es la misma que la del campo magnético generado en el estator, es decir se mantienen en sincronía.

Este tipo de motores suelen utilizarse en grandes máquinas con carga variable y necesitan trabajar a una velocidad constante. Por su tipo de construcción y grandes fuerzas de inercia no se recomiendan para aplicaciones de velocidad variable.

Es un tipo de motor utilizado en un gran número de aplicaciones, sin embargo no es la tecnología más apropiada para la propulsión de la embarcación solar. Por este motivo, se ha limitado su desarrollo teórico.

Motores de corriente continua

Todas las máquinas eléctricas (motores o generadores) necesitan una relación entre campos magnéticos para generar movimiento, o dicho de otro modo, convertir energía eléctrica en mecánica. Así que el motor de corriente continua mantiene el mismo concepto de funcionamiento que los de alterna, excepto que los campos magnéticos son generados por una componente continua y unos polos magnéticos ubicados en el estator.

De todas las tecnologías en máquinas de corriente continua, se clasifican en dos categorías. De autoexcitación y de excitación independiente.

Los primeros son motores que incorporan un sistema de excitación con la propia corriente de la máquina, los hay de conexión serie, paralelo y mixto. Los de excitación independiente, se clasifican en motores de campo devanado y motores de imán permanente. Siendo este último el que se va a describir debido a su idoneidad para nuestro diseño.

Motor de imán permanente

En este tipo de motor se caracterizan porque utilizan la combinación de campos magnéticos de naturaleza permanente (Imanes) y los campos magnéticos producidos por la corriente de excitación externa que fluye a través de los bobinados.

El campo magnético genera por unos imanes ubicados en el estator. Induciendo corrientes mediante dos imanes fijos que poseen de por sí, la propiedad magnética. Ver en la figura

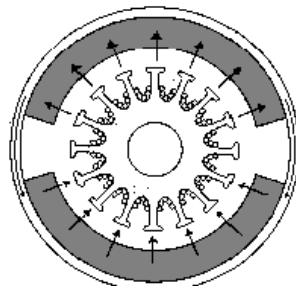


Figura 2.15 - Esquema de un motor de imanes permanentes²⁶

²⁶ Fuente: <http://proton.ucting.udg.mx/dpto/tesis/quetzal/CAPITUL4.html>

Como ventaja, no requiere energía para la excitación de dichos polos magnéticos. Así se evitan pérdidas y se mejora la eficiencia del motor (dependiendo del tamaño puede ser importante). Posee grandes aceleraciones, ya que por su constitución tiene una inercia menor que el resto.

La relación entre la velocidad y la tensión es muy lineal. También lo es la del par motor con la corriente. En los dos casos, se podría decir que son casi proporcionales.

No se tiene un control del campo de excitación ya que está fijado por la característica del imán. Pese a que pueda parecer un inconveniente, puede resultar muy útil para diseños en los que se requiera una excitación constante.

En cuanto a sus inconvenientes, se pueden describir dos: En condiciones de uso muy desfavorables, se pueden desmagnetizar sus imanes. Aunque de un modo muy leve, puede llegar a niveles irreversibles que empeoran sus condiciones de funcionamiento. En segundo lugar, mencionar que este tipo de motor es el que tiene el precio más elevado.

Existen otros tipos de motores como los “Brushless”, que no funcionan bajo el concepto de motor tradicional de continua, es decir sin imanes permanentes; pero a través de un sistema de conmutación por dispositivos electrónicos (tipo transistores bipolares) desplazar el campo magnético y hacer funcionar el motor sin la necesidad de escobillas.

2.3.5 Regulación de motores

Partiendo de la necesidad de un control en la velocidad que llevaría la embarcación, se hace obvia la necesidad de un sistema que permita regular la velocidad de giro de los motores que proporcionan la fuerza motriz a la hélice del sistema de propulsión.

Otra necesidad es el control del cambio del sentido en los motores, prestación necesaria para el frenado de la embarcación y la posibilidad de maniobrar en sentido contrario. Es decir, desplazarse *marcha atrás*.

Dicho control no puede ser de tipo “Todo-Nada”, así que se precisará de un control de velocidad preciso, que permita cambios progresivos en el régimen de potencia del motor.

A continuación, de un modo resumido se explican las principales tecnologías empleadas para la regulación de velocidad de los diferentes tipos de motores anteriormente tratados.

Las diferentes tecnologías empleadas en la regulación de motores, pueden variar depende de la magnitud controlada, pudiendo haber reguladores mecánicos, hidráulicos, eléctricos y puramente electrónicos. Cada tecnología tiene sus parámetros específicos, por lo que analizarlos todos resultaría demasiado extenso. En términos generales, el presente proyecto trabajará con regulación electrónica.

Dependiendo del tipo de motor los reguladores se pueden dividir en dos grandes grupos: Control de motores de corriente alterna y control de motores de corriente continua.

Regulación de motores AC

Dada la imposibilidad de una regulación de velocidad a través de la tensión de entrada, se necesita un dispositivo electrónico que varíe otros parámetros de la señal. Éste es el variador electrónico de frecuencia.

El dispositivo regula la frecuencia del voltaje de entrada del motor, logrando modificar su velocidad. Sin embargo, simultáneamente con el cambio de frecuencia, se debe variar el voltaje aplicado al motor para evitar una corriente elevada que dañaría el motor.

Los variadores más utilizados utilizan modulación PWM (Modulación de Ancho de Pulsos) que permite regular la frecuencia de una forma óptima. El dispositivo modifica la señal de entrada de corriente alterna y de algún modo varía la forma en que entrega la energía.

Se explica brevemente las etapas sobre las que trabaja un variador de frecuencia:

1. *Rectificación.* Convierte la tensión AC en DC.
2. *Filtrado.* Se filtra la tensión rectificada para reducir la emisión de armónicos.
3. *Inversor.* Convierte la señal continua en otra de tensión y frecuencia variables.
4. *Etapas de control.* Se permiten controlar parámetros externos.

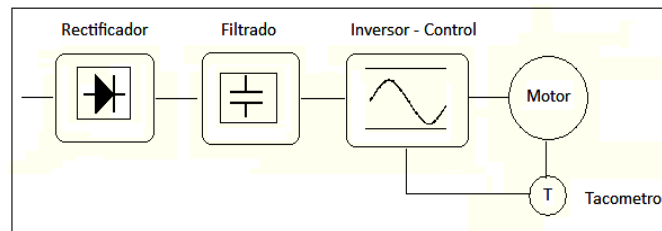


Figura 2.16 - Diagrama de flujo de cómo opera un variador de frecuencia²⁷

Una breve descripción en cuanto a los elementos electrónicos implicados en el proceso.

- En la primera etapa de rectificación, mediante diodos o tiristores se convierte la señal de entrada a una señal continua (con armónicos).
- La señal circula a través condensadores y bobinas que la filtran para reducir los armónicos y obtener una señal de continua de mejor calidad.
- En la etapa del inversor, se crea la señal variable mediante IGBT's (Transistor bipolar controlado) que generan pulsos controlados de tensión de duración variable, y así se obtiene una corriente prácticamente senoidal para alimentar el motor.
- Los equipos de última generación incorporan IGBT's gestionados por microprocesador que consigue optimizar el control.

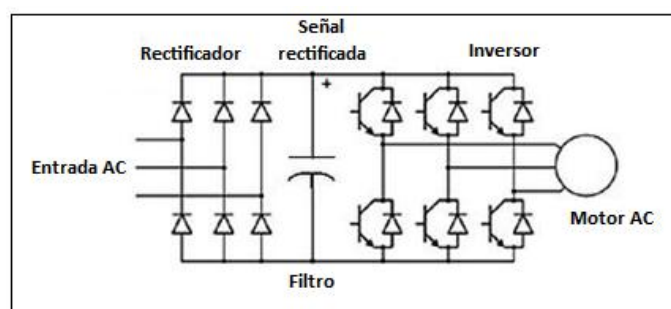


Figura 2.17 - Esquema electrónico general de un variador de frecuencia trifásico²⁸

A modo resumen. La calidad del control de velocidad de motores AC requiere un dispositivo que regule de una forma precisa, los niveles de frecuencia de la señal que alimenta el motor. Dicha señal tiene que ser lo más lineal posible sin armónicos ni oscilaciones que provoquen un mal funcionamiento del motor.

²⁷ Fuente: Elaboración propia

²⁸ Fuente: Elaboración propia

Regulación de motores DC.

En motores de corriente continua, la velocidad de giro es proporcional a tensión de inducido, lo que indica que al variar tensión o intensidad de entrada se puede controlar su velocidad.

Según la magnitud que se va a variar, existen las siguientes posibilidades de control.

- Tensión. Variar su nivel de la entrada al devanado inducido.
- Intensidad. Variar el flujo de corriente del inductor.

El método de regulación más utilizado es el de tensión. Dentro de los de ellos, el control electrónico es el que mejor se adecua a un sistema en el que el aprovechamiento de energía es primordial. Por ejemplo, utilizando un reóstato, se desperdicia energía y en consecuencia disminuye la eficiencia global del sistema.

El procedimiento de control consiste en variar el voltaje de alimentación del motor, manteniendo constante su excitación. Se opera la señal de corriente continua con transistores de potencia que realizan la conmutación en tiempos ínfimos. El dispositivo encargado de hacerlo, se le denomina convertidor continua-continua.

Existen complejos modelos matemáticos que permiten llevar la regulación a un puntos óptimos, como los sistemas de control en lazo cerrado. Pero su desarrollo sería demasiado extenso saliendo del alcance del presente proyecto.

Para entender el concepto de regulación de velocidad por variación de la alimentación del motor, se va a describir un circuito electrónico básico, capaz de variar los niveles de tensión de una señal continua, y se va a hacer una breve reseña sobre los otros tipos más desarrollados.

Se trata de un convertidor CC-CC elevador. Su principio de funcionamiento es derivar una corriente a una bobina, mediante la operación de un conmutador electrónico de alta velocidad, para posteriormente entregarla a la red.

La etapa de funcionamiento en la que trabaja el conversor es la siguiente:

- Mientras el *conmutador* está cerrado, la energía se acumula en la bobina, y es el condensador el que mantiene la tensión de salida hacia la carga.
- Cuando el *conmutador* abre, la tensión de salida es la suma del valor nominal de entrada más la que aporta la bobina al devolver la energía almacenada.
- De esta forma consigue elevar la tensión a los niveles de diseño.

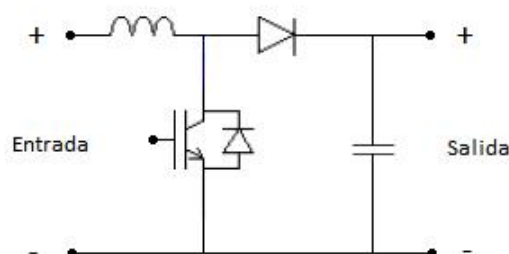


Figura 2.18 - Esquema electrónico general de un variador de frecuencia trifásico²⁹

El elemento de conmutación es el dispositivo electrónico de potencia IGBT (Transistor bipolar controlado) regulado para que durante un determinado tiempo esté abierto y el resto cerrado.

²⁹ Fuente: Elaboración propia

Dicho periodo de tiempo depende de una variable de control del circuito denominada ciclo de trabajo (D), que indica el porcentaje de tiempo en el que el conmutador está cerrado (y la bobina acumula energía).

Con la bobina de entrada y el condensador de salida ya se tiene el filtro necesario para que la corriente de entrada y la tensión de salida tengan un nivel de calidad aceptable. Determinando el valor óptimo de estos componentes, se puede limitar la cantidad de rizado que tendrá la componente continua.

El tipo de convertidor explicado tiene ciertos límites en el control de la señal. Aunque siguiendo el mismo concepto y utilizando los mismos componentes se puede montar el convertidor CC-CC reductor, o bien el elevador-reductor, que sería el más versátil.

El elevador-reductor permite variar el ciclo de trabajo D , de 0 a 1, es decir un rango de variación del 100% que teóricamente permite regular la tensión de salida desde 0 a infinito, evidentemente dentro de unos límites de potencia.

3. Enfoque de la resolución

3.1 Parámetros de diseño en la estructura de la embarcación

En el presente apartado de desarrollo de la embarcación se van a determinar que parámetros influyen en el aprovechamiento de la energía. Es decir, factores que contribuyan a realizar una embarcación eficiente, donde prime la optimización del consumo de energía.

Con esta consideración se trabajan sobre los siguientes puntos:

- Tipo de embarcación
- Dimensiones y peso
- Materiales de construcción
- Resistencia hidrodinámica del casco

En primer lugar se define el casco de la embarcación, dato de partida que sustenta los cálculos posteriores. Dichos cálculos son el peso específico del casco, peso global estimado y una estimación de la resistencia al avance que debe vencer la embarcación para desplazarse. Los cálculos detallados se abordaran en fases posteriores especializadas en el diseño naval.

3.1.1 Tipo de embarcación

En base a la investigación previa resumida en el apartado de estado del arte, se va a definir qué tipo de embarcación es la más apropiada para el desarrollo del proyecto.

Justificación

Se necesita una embarcación con ciertos niveles de estabilidad, ya que está destinada al transporte de pasajeros dentro de un ámbito turístico.

Si la embarcación se realiza con una construcción de tipo monocasco, al pretender hacer un diseño muy hidrodinámico como el utilizado en los veleros, no tendría demasiada estabilidad; sino más bien se debería hacer de tipo lanchón o barcaza plana suponiendo más resistencia al avance. Sin embargo el catamarán, al tener dos superficies de apoyo sobre el agua, posee mejores niveles de estabilidad y en consecuencia más confort para sus pasajeros.

Otro aspecto muy importante a considerar, es el coeficiente hidrodinámico que depende por completo de la forma del casco. En el caso del catamarán, sus dos cascos son más afilados y le proporcionan mejor comportamiento hidrodinámico al conjunto de la embarcación. Este parámetro es determinante, para ofrecer menos resistencia al avance dentro del agua, mejorando el rendimiento del sistema de propulsión y optimizando la energía disponible.

Por último, el tipo de casco también contribuye a tener una embarcación más o menos ligera. El concepto de construcción del catamarán necesita menos volumen de material, ya que toda la parte central está suspendida sobre los dos flotadores laterales y la parte inferior es “hueca”, en conjunto el peso de la embarcación es menor.

Con estos argumentos se tiene justificación suficiente, para determinar al catamarán como el tipo de tecnología naval de construcción más adecuada.

Dimensiones de la embarcación

En base a los datos de partida del diseño de la embarcación, capacidad de pasajeros y especificaciones básicas, se elaboró el siguiente esbozo. Ha sido necesario para obtener las superficies del casco y determinar su volumen, parámetros con los cuales se determina el volumen de agua desplazada, y la relación entre el peso de la embarcación y su calado.

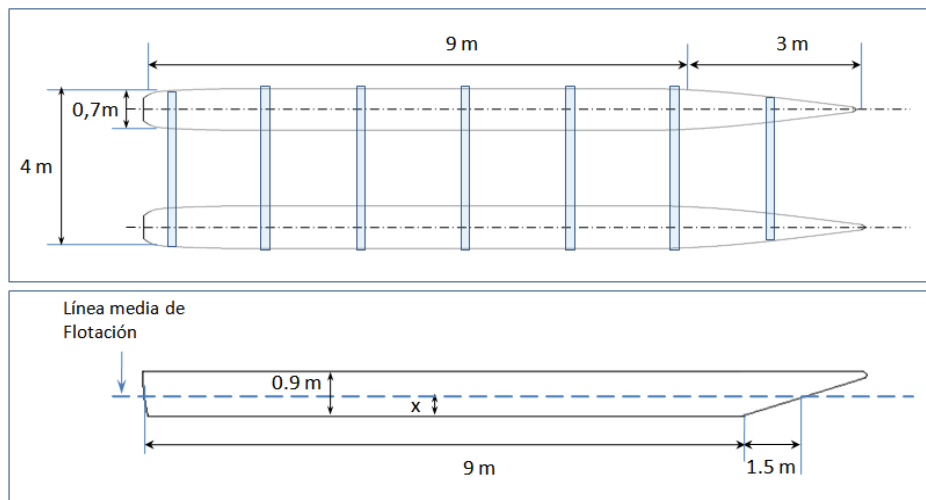


Figura 3.1 – Esquema casco embarcación³⁰

Dado que el objetivo del desarrollo, es determinar los parámetros que interactúan entre la embarcación y el agua, solamente se ha elaborado el diseño del casco.

Superficies de flotación

En primer lugar, se determina el área del casco para obtener el volumen de agua desplazado para una profundidad de calado determinada. Posteriormente, con este volumen se obtendrá su peso específico.

En otras palabras; conociendo el área del casco que está sumergida y teniendo el dato del calado se puede determinar el volumen y peso que el agua puede soportar para ese determinado cuerpo³¹.

En la siguiente tabla, se resumen los resultados de los cálculos referidos a superficies y volúmenes del casco que conforma el catamarán.

Relaciones Peso/Volumen		
Superficie de flotación del casco	m ²	14,70
Volumen desalojado para 0,5m de calado sumergido	m ³	7,35
Masa equivalente desplazada	Kg	7350

*Considerando la densidad del agua (1000Kg/m3)

Tras el cálculo, se puede estimar el peso máximo de la embarcación para las condiciones de diseño mencionadas. Es decir, para no superar los 50cm de calado se debe respetar el valor de peso máximo admisible de 7350kg (incluyendo la carga de pasajeros y tripulantes). Con ello, se conocen los límites de peso que pueden influir en criterios de selección para el resto de elementos que componen la embarcación.

³⁰ Fuente: Elaboración propia

³¹ Principio de Arquímedes: "Todo cuerpo parcialmente o totalmente sumergido en un fluido, recibe un empuje vertical, dirigido desde abajo hacia arriba igual al peso del fluido desplazado aplicado en el centro del volumen sumergido".

Peso del Casco

Existen muchos tipos de materiales para la construcción de embarcaciones. En el caso de la embarcación solar, se ha buscado uno que proporcione la mejor relación de peso posible.

Se plantearon cuatro hipótesis de materiales:

- Acero
- Aluminio
- Madera recubierta de fibra de vidrio, o resina epoxi
- Compuesto de fibras con materiales sintéticos

Considerando las dimensiones del casco de la embarcación, se ha elaborado una hoja de cálculo que determina el peso total del casco en función del tipo de material empleado. A continuación se muestra un resumen del cálculo.

Relación de pesos con el tipo de material empleado				
Tipo de material	Densidad (kg/m ³)	Volumen de material (m ³)	Peso (Kg)	Relación de pesos (%)
Acero	7850	0,264	2069,6	100,0%
Aluminio	2700	0,298	798,6	39%
Madera- Fibra	680	1,553	1055,9	51%
PVC –Fibra	1500	0,663	994,9	48%

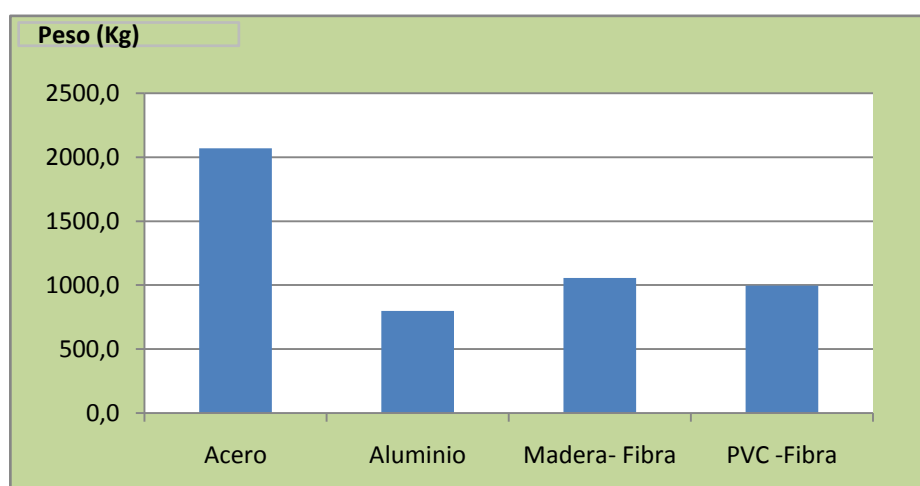


Figura 3.2 – Relación Material / Peso del casco ³²

En el gráfico se puede observar, como las diferencias de peso en relación al material utilizado son considerables.

Dicha comparativa destaca al aluminio como la configuración más ligera. Para el mismo tipo de casco su peso será un 60% inferior el que supondría empleando acero.

Considerando que las tecnologías de fabricación con aluminio disponibles en la región, todavía no ofrecen suficientes garantías, se ha considerado la alternativa del compuesto de fibra con materiales sintéticos. En definitiva, se contemplan las dos posibilidades: Aluminio y Fibra.

De un modo orientativo, el peso de los dos cascos del catamarán con la estructura que los une (tal como indica el croquis) queda comprendido entre 0,8 y 1 Tn.

³² Fuente: Elaboración propia

Peso estimado de la embarcación

A partir del peso del casco y conociendo el peso máximo admisible de la embarcación se pueden estimar los límites de peso para otros elementos que componen la embarcación.

Con el dato de peso máximo admisible de 7,35Tn se pueden establecer unos límites en los pesos máximos de los diferentes elementos, como baterías, paneles fotovoltaicos y el diseño de la construcción de la superestructura.

Peso en Vacío				
	Elemento	Peso Unitario	Cantidad	Total
Equipamiento energético	Paneles Solares	14	45	630
	Baterías	25	72	1800
	Cargador Batería	10	1	10
	Seguidor PMP	5	3	15
	Regulador Velocidad	10	2	20
	Motores	25	2	50
	Generador Auxiliar	75	2	150
Casco	Casco Aluminio	1000	1	800
Estructura Superior	Estructura de Aluminio*	800	1	1000
Sistemas propulsión	Multiplicador, ejes, hélices.	60	2	120
Total				4595

Peso Pasajeros y Carga				
	Elemento	Peso Unitario	Cantidad	Total
	Pasajeros	70	30	2100
	Tripulación	70	2	140
	Equipaje de mano	5	30	150
Total				2390

Peso Totales - Según el régimen de ocupación				
Peso en Vacío	Carga 25%	Carga 50%	Carga 75%	Carga 100%
4595	5192,5	5790	6387,5	6985

Además del peso en vacío de la embarcación, se contemplan la cantidad de pasajeros. Con ello se tiene la posibilidad de determinar la variación en la profundidad del calado para diferentes niveles de ocupación.

Como se verá a continuación, la dependencia entre el peso de la embarcación y la resistencia al avance en el agua no es directa, pero sí lo es con su calado. Éste aumenta proporcionalmente con el peso, incrementando el área de carena³³ y por tanto aumentando la superficie en contacto con el agua.

El parámetro de superficie, sí tiene una influencia directa sobre la resistencia y en consecuencia la demanda de potencia y consumo de energía.

³³ **Carena:** Parte del casco que se encuentra sumergida. Es decir, la superficie que queda debajo de la línea de flotación

Resistencia al avance

El objetivo de la estimación del valor de resistencia que debe vencer la embarcación para avanzar, es determinar un valor aproximado de la potencia que necesitará para hacerlo, y proporcionar un dato fiable para el dimensionamiento del sistema de propulsión.

Para la estimación de la resistencia, se ha utilizado una fórmula de cálculo hidrodinámico³⁴. Que relaciona los factores superficie, velocidad y forma de la carena.

$$R_x = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_x \cdot S \cdot v^2$$

ρ	kg/m3	Densidad agua dulce
C_x	Adim	Coefficiente de Forma
S	m2	Superficie de contacto
v	m/s	Velocidad de avance

En cuanto a la procedencia de estos datos se hace una breve mención a continuación.

- Superficie. Se ha calculado a partir del producto entre el perímetro de la carena de la embarcación y la profundidad del calado (parámetro dependiente del peso)
- Los rangos de velocidad vienen dados por las especificaciones básicas de la embarcación.
- Por último, el factor de forma de la carena, parámetro fundamental para el cálculo que requiere conocimientos avanzados de cálculo naval que salen fuera del alcance del presente proyecto. La determinación de este dato se extrajo de una tabla³⁵ que muestra los valores típicos para diferentes tipos de cálculos.

Para determinar la potencia del propulsor de la embarcación se debe considerar la velocidad de avance de la hélice de la embarcación. Para el presente cálculo, se contempla la misma del modelo utilizado en el cálculo de la carena³⁶

$$P_x = R_x \cdot V_a^*$$

Nivel de carga		Sin Carga		Carga al 50%		Carga al 100%	
Velocidad		Resistencia	Potencia	Resistencia	Potencia	Resistencia	Potencia
Km/h	m/s	Newtons	kW	Newtons	kW	Newtons	kW
7	1,9	1288,8	6,62	1623,9	8,35	1959,1	10,07
8	2,2	1683,4	8,65	2121,1	10,90	2558,8	13,15
9	2,5	2130,5	10,95	2684,5	13,80	3238,4	16,65
10	2,8	2630,3	13,52	3314,2	17,03	3998,1	20,55
11	3,1	3182,6	16,36	4010,2	20,61	4837,7	24,87
12	3,3	3787,6	19,47	4772,4	24,53	5757,2	29,59
13	3,6	4445,2	22,85	5601,0	28,79	6756,7	34,73
14	3,9	5155,4	26,50	6495,8	33,39	7836,2	40,28
15	4,2	5918,1	30,42	7456,9	38,33	8995,7	46,24

Los detalles de cálculo se encuentran en la hoja de cálculo adjunta en los anexos.

³⁴ **Resistencia avance:** http://www.fondear.org/infonautic/Barco/Apuntes_Tecnicos/ConstruccionNaval/CN_3a.pdf

³² **Coef. Forma carena:** http://www.fondear.org/infonautic/Barco/Apuntes_Tecnicos/ConstruccionNaval/CN_7c.pdf

³³ **Propulsión buque:** http://www.fondear.org/infonautic/Barco/Apuntes_Tecnicos/ConstruccionNaval/CN_8a.pdf

A continuación, se muestra gráficamente como afecta en demanda de potencia los parámetros de velocidad y nivel de carga de la embarcación.

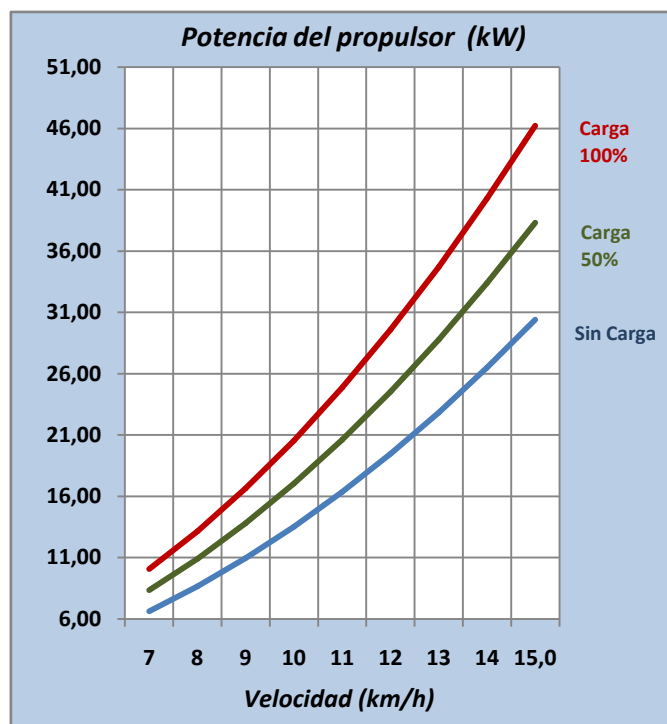


Figura 3.3 - Características relevantes en motores DC y AC³⁷

Se puede observar como la demanda de potencia crece de una forma cuadrática, a medida que se aumenta la velocidad. Por lo que es muy importante mantener los parámetros de velocidad definidos para mantener el consumo.

Para velocidades y cargas moderadas, se pueden tener demandas de potencia de 10 a 15kW, por lo que para velocidades máximas transportando todos los pasajeros que permite la embarcación se eleva a 46kW.

En el caso concreto del presente proyecto se va considerar los siguientes límites de velocidad:

Velocidad de crucero: De 8 a 10 km/h

Será la velocidad a la que circula la embarcación durante prácticamente todo el periodo de navegación excepto momentos puntuales y los proceso de aceleración deceleración. Dicho consumo, se mantiene dentro de un promedio de 13 a 20kW eléctricos de potencia, para la embarcación cargada a su máxima capacidad.

Velocidad máxima: De 12 a 15 Km/h

Velocidad máxima que podrá alcanzar la embarcación por su potencia instalada y por prestaciones. Pero no son niveles recomendables si se pretende mantener el consumo en niveles moderados. Cabe mencionar que en determinadas condiciones de plena ocupación, no será posible alcanzarla ya que se excede el límite de potencia instalada.

³⁷ Fuente: Elaboración propia

3.2 Sistemas de propulsión

A continuación se va a determinar qué tipo de tecnología es la más adecuada para la propulsión de la embarcación. Analizando las tecnologías disponibles sobre motores eléctricos se observa la oferta es muy extensa, por ello el primer paso es discriminar cual se adapta mejor a las necesidades.

En primer lugar mencionar tres aspectos que fundamenta dicha selección.

- Relación Tensión-Velocidad lo más lineal posible
- Sistema con aprovechamiento de energía óptimo
- Dentro de las posibilidades que tenga un bajo mantenimiento

Con estos datos de partida se han seleccionado dos tipos de motores: de corriente continua y de corriente alterna. Dentro de ambas categorías se optado por motores con relativa simplicidad, robustos y de uso extendido. En la siguiente tabla, se muestra de un modo muy resumido sus principales características.

	Motor DC (imanes permanentes)	Motor AC (rotor jaula de ardilla)
Características del Motor	Tiene par de arranque más elevado Rendimientos aproximados del 90% Es más costoso	Su construcción es más simple Tiene menos pérdidas y por lo tanto mejores rendimientos. Por su uso extendido, es más económico
Control de velocidad	Regulación de velocidad puede ser mucho más simple.	Regulación de velocidad más compleja
Alimentación	Con sistemas FV es directa	Con sistemas FV requiere un inversor
Mantenimiento Eléctrico	Para los de I.P requieren poco mantenimiento	Generalmente no requiere

Figura 3.4 - Características relevantes en motores DC y AC³⁸

Existen “pros y contras” para las dos tipos de motores, pero cabe tener en cuenta que:

- La entrada de alimentación desde las baterías es en corriente continua
- El control de velocidad en motores de corriente continua, es menos complejo.

Con ello tenemos dos factores que determinan al sistema de propulsión con motor de corriente continua, como la alternativa que va a utilizar la embarcación.

³⁸ Fuente: Elaboración propia

3.2.1 Grupo de propulsión con un motor DC

Para la propulsión de la embarcación se requiere de un conjunto de elementos que convierten la energía eléctrica acumulada en las baterías en la fuerza necesaria para desplazarla. A continuación se muestra de forma esquemática los elementos que la componen.

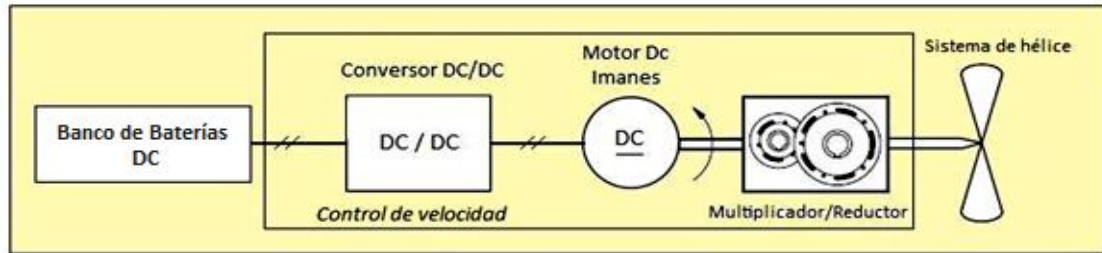


Figura 3.5- Elementos que componen el sistema de propulsión DC³⁹

La parte activa de la propulsión, es un motor de corriente continua de imanes permanentes, que recibe la alimentación del banco de baterías instalado en la embarcación. La regulación de velocidad se efectúa mediante un convertor DC/DC que modula la señal de entrada al motor para variar su régimen de giro. Por último un sistema mecánico reductor adapta la velocidad de giro del motor a la requerida por la hélice que proporciona el empuje al barco.

Por las características de la embarcación de tipo catamarán, necesita dos grupos de propulsión, uno para cada casco.

Motor DC

Dentro del amplio abanico de este tipo de motores, se ha investigado sobre modelos concretos de motores de corriente continua destinados a la propulsión naval.

En primer lugar, se ha estimado la demanda de potencia necesaria para que la embarcación pueda desplazarse y así obtener un factor determinante para la selección del motor. En la siguiente tabla, se muestran las demandas energéticas asociadas a diferentes condiciones de funcionamiento y rango de velocidades de la embarcación.

Nivel de Carga	25% Carga	50% Carga	75% Carga	100% Carga
Velocidad (Km/h)	Potencia (kW)			
7	7,49	8,35	9,21	10,07
8	9,78	10,90	12,03	13,15
9	12,37	13,80	15,22	16,65
10	15,28	17,03	18,79	20,55
11	18,49	20,61	22,74	24,87
12	22,00	24,53	27,06	29,59
13	25,82	28,79	31,76	34,73
14	29,94	33,39	36,83	40,28
15,0	34,37	38,33	42,28	46,24
Promedio según velocidades	19,50	21,75	23,99	26,24
Promedio cargas	22,87			

El método utilizado es hacer un promedio de las demandas donde se determina el límite inferior y superior de potencias. Dando un rango de potencia entre 22,9kW y 26,2kW.

³⁹ Fuente: Elaboración propia

A partir de estos datos se ha definido los siguiente parámetros de dimensionado del motor, para determinar el modelo más adecuado.

- Tipo de motor: Corriente continua de imanes permanentes
- Potencia nominal: De 10 a 15kW
- Tensión de trabajo > 48V
- Buena relación de rendimiento > 90%
- Bajo peso
- Certificado de calidad

A continuación se argumenta la elección los factores mencionados.

Como se mencionó en el apartado del estado del arte el motor de imanes permanentes tiene varias ventajas respecto al resto de tecnologías, destacando los siguientes puntos:

- La relación tensión velocidad es muy lineal, parámetro importante para la regulación
- Tiene mayor par de arranque mayor y por lo tanto mejor aceleración
- No requiere energía para la excitación, por lo que disminuye las pérdidas
- Al tener menos pérdidas mejora su eficiencia

Pese a ser un motor más costoso se tienen argumentos suficientes que abalan su elección.

En lo relativo a la tensión de alimentación. Es sabido que a mayor voltaje menor intensidad y en consecuencia menores pérdidas. Esto favorece dos puntos: Se requiere menor sección en los conductores, y el dimensionado del convertidor electrónico que lo alimenta será menor. Por ello se ha elegido un motor de corriente continua con la mayor tensión disponible.

En cuanto al peso, resulta evidente buscar una tecnología lo más ligera posible siempre que ofrezca unos niveles de calidad y sea una máquina robusta.

Regulación DC

Para el control de velocidad del motor, se va a utilizar un regulador electrónico de ancho de pulso PWM. Actualmente uno de los sistemas de regulación más utilizados, con grandes posibilidades para realizar sistemas de control automático con lazo cerrado.

Como se explicó en la descriptiva de tecnologías; es un dispositivo que modula la señal de entrada de continua que alimenta el motor, mediante transistores de potencia IGBT. Convierte la señal y genera micropulsos que permiten variar la cantidad de energía que se entrega.

Debido a la dependencia lineal entre la tensión de alimentación del motor y su velocidad, se ha optado por este tipo de control.

Grupo reductor

Generalmente la velocidad de giro del motor y la de eje que acopla la hélice del barco son distintas. Por lo que se necesita un dispositivo mecánico que transfiera la fuerza del par motor a la hélice adaptando las diferentes velocidades de giro.

Dicho dispositivo es un grupo reductor que mediante un sistema de engranajes transfiere el movimiento, adaptando las distintas velocidades como una caja de cambios de un automóvil. Motivo por lo que este elemento se hace imprescindible en el grupo de propulsión.

3.2.2 Elección del grupo de propulsión

Respondiendo a los parámetros anteriormente descritos, existe un fabricante que ofrece una solución integral para todo el grupo de propulsión. El producto pertenece a una empresa ASMO Marine⁴⁰ especializada en motores eléctricos para embarcaciones. Que consiste en los siguientes elementos:

- Motor de corriente continua de imanes permanentes
- Sistema de regulación de velocidad por control electrónico PWM
- Sistema reductor por engranajes mecánicos

A continuación se hace una breve descripción de cada una de estos elementos.

Datos técnicos del motor:

Technical data	
Motor type:	AM 200 / 135
Voltage	72V DC
Current:	200 Amp (limited by motor controller)
Power output:	13,3 KW
Average efficiency:	93%
Battery recharge function:	Yes
Rated speed engine:	3.240 rpm
Rated torque:	36.3 Nm
Speed constant:	45 rpm/V
Peak current:	400 Amp
Peak Power:	26.7 KW
Peak torque:	73.3 NM

Figura 3.6- Datos técnicos motor ASMO AM 200⁴¹

Tiene una entrada de alimentación de 72V por lo que disminuye la intensidad de entrada que en caso de utilizar voltajes inferiores sería muy elevada. Primer factor a favor para disminuir las pérdidas globales del sistema.

Su nivel de rendimiento es muy bueno alcanzando un valor aproximado del 93%. A partir de los datos de potencia y fuerza torque nominal, se ha comprobado matemáticamente.

$$T_{\text{Nominal}} = \frac{P_{\text{Nominal}} \cdot 60 \cdot \eta}{2\pi \cdot \text{rpm}} = \frac{13300 \text{ kW} \cdot 60 \text{ s} \cdot 0,93}{2\pi \cdot 3240 \text{ rpm}} = 36,41 \text{ Nm}$$

Tiene un limitador para el consumo de corriente del motor que lo protege de sobrecargas.

No obstante el motor deberá soportar unos picos de potencia en el periodo de arranque y aceleración de la embarcación, donde la demanda de energía aumenta considerablemente hasta incluso duplicarse.

Es importante destacar, que dicha demanda no puede mantenerse durante más que unos segundos, ya que de lo contrario el motor puede sufrir recalentamientos que podrían dañar sus bobinados internos. Para ello, incorpora dicho sistema de protección que evita elevadas demandas de potencia para periodos de tiempo excesivos.

⁴⁰ Fuente: [http:// www.asmomarine.com](http://www.asmomarine.com)

⁴¹ Fuente: [http:// www.asmomarine.com](http://www.asmomarine.com)

Curvas características del motor

A continuación, se muestran las diferentes curvas de parámetros que describen el motor. El principal motivo por el que se ha mostrado la presente gráfica, es para mostrar cuanto lineal es la relaciones potencia/par motor y como aumenta la velocidad con la tensión de entrada.

En primer lugar, mencionar que aunque en la gráfica no aparece ningún nivel de tensión, existe una dependencia directa entre ésta y la velocidad del motor, con una relación 45rpm/voltio.

La siguiente característica corresponde al rendimiento. Se puede ver que es relativamente constante, excepto cuando trabaja a muy baja potencia. Estos niveles de rendimiento son los que influyen en los siguientes valores de par motor y potencia.

La recta de potencia ascendería hasta los 19kW. Pero en el caso del motor que tiene una corriente limitada a 200 amperios se mantiene en aproximadamente 13,3kW.

Con el par motor ocurre lo mismo, incrementa proporcionalmente con la corriente del motor y permanece estable en el valor máximo de aproximadamente 36Nm.

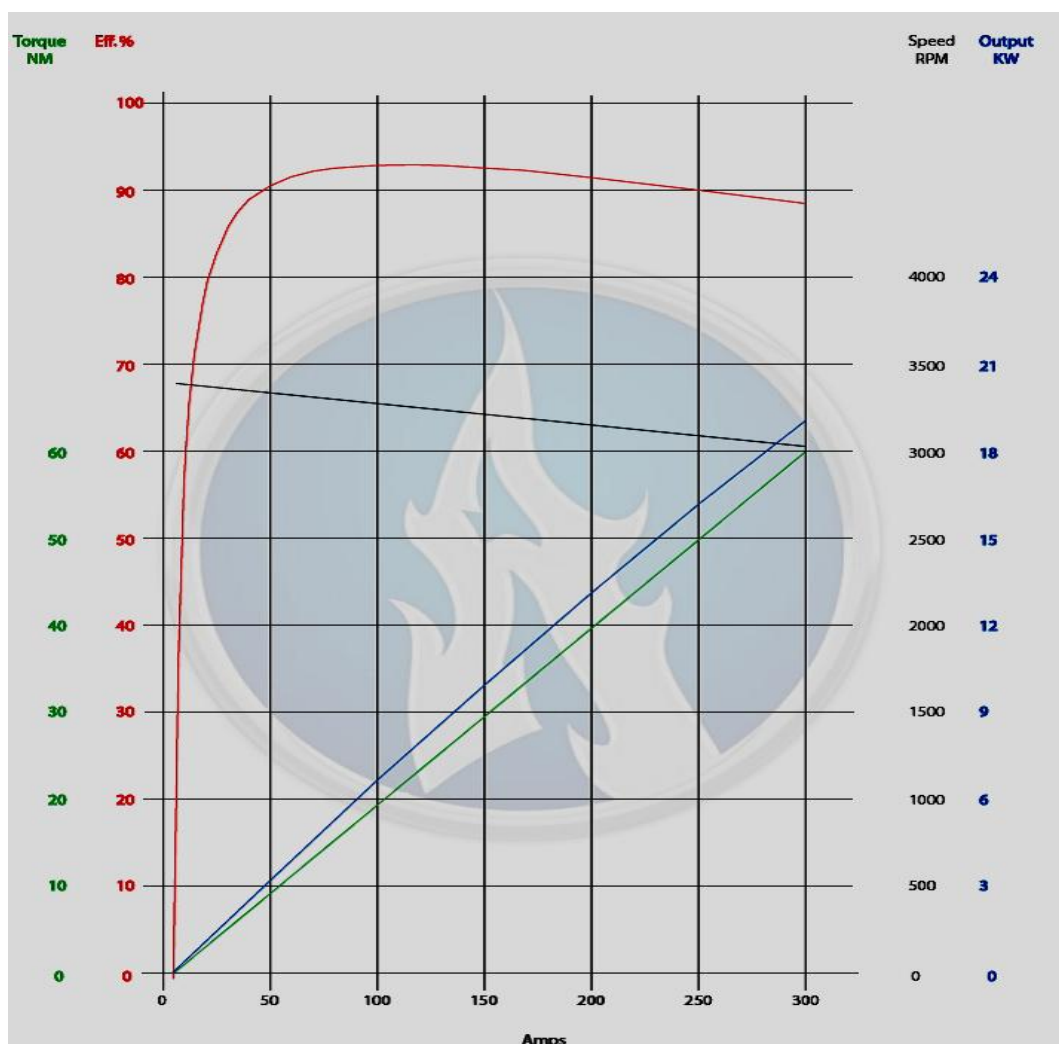


Figura 3.7 - Curva de características del motor de corriente continua Agni Motor 143 Series⁴²

⁴² Fuente: http://www.agnimotors.com/143_Series_Performance_Graphs.pdf

Los detalles del sistema de control, se han obtenido de su homólogo de menor potencia⁴³ con la diferencia que la tensión de trabajo es de 48v, aunque a nivel funcional es idéntico. Dichas características se detallan a continuación.

- Se trata de un convertidor DC/DC con modulación de ancho de pulso PWM, capaz de generar pulsos hasta un rango de frecuencias de 18 kHz.
- Tiene un control de velocidad muy preciso, con un rango de regulación de 0 a 72V, que traducido a velocidad sería 45rpm del motor.
- Adicionalmente dispone de protecciones para sobrecargas del motor, o niveles de sobretensión o intensidad desde las propias baterías.
- En cuanto a dimensiones, posee la ventaja de su bajo peso, menor a 2kg.

Por último, el sistema mecánico de engranajes tiene las siguientes características:

Reduction:	AM D/03
Standard gearing:	22:56 wheel combination
Gear Belt:	624
Standard Rpm propeller shaft:	1270 Rpm

Figura 3.8 - Características grupo de transmisión THOOSA 13

Como se menciona con anterioridad es necesario reducir la velocidad de giro del motor a una más lenta que proporcione más par, o lo denominado de otra forma, más fuerza al empuje del sistema de propulsión.

La relación de reducción del sistema es de 22/56 que disminuye los 3240rpm de la velocidad de giro nominal del motor a un tercio de su valor 1270rpm. Esta reducción afecta a su fuerza par del siguiente modo.

$$T_{\text{Nominal}} = \frac{P_{\text{Nominal}} \cdot 60 \cdot \eta}{2\pi \cdot \text{rpm}} = \frac{13300 \text{ kW} \cdot 60 \text{ s} \cdot 0,93}{2\pi \cdot 1270 \text{ rpm}} = 92,88 \text{ Nm}$$

Este dato argumenta la implementación del sistema de reductor ya que la fuerza del motor aumenta en la misma proporción que disminuye la velocidad de giro, en el caso concreto del presente modelo prácticamente lo triplica.

El mismo fabricante dispone de otros sistemas de engranajes con diferentes relaciones de marchas dando la posibilidad de variar aumentar hasta cinco veces el par nominal del motor.

⁴³ Fuente: <http://www.asmokarts.com/> - Controllers

3.3 Generación de energía fotovoltaica

3.3.1 Superficie de captación

En el caso específico de la embarcación, el área de captación vendrá determinada por las dimensiones del barco en concreto las de su cubierta; siendo el lugar donde van instalados los paneles fotovoltaicos.

Viendo apartados anteriores, se puede ver como las dimensiones del casco de la embarcación son 12 metros de eslora por 4 metros de manga. La cubierta superior donde se alojan los paneles ocupa la misma superficie que el casco más un espacio voladizo que sobresale unos centímetros en todo su perímetro.

Se plantea una superficie de captación con la siguiente forma, con el fin de optimizar el espacio dando la posibilidad de instalar el máximo número de paneles, respetando las dimensiones de diseño de la embarcación.

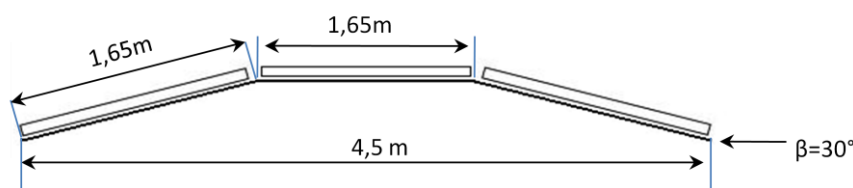


Figura 3.9 - Inclinación paneles FV⁴⁴

En total se dispone de 13 metros de longitud por 4,95 metros de anchura, ya que la inclinación β de las superficies laterales amplía el espacio útil. El área bruta de la superficie de captación asciende a los 64,35 m². Conociendo el dato de superficie, se puede concretar las dimensiones del módulo que se va a precisar.

El siguiente paso es la búsqueda de una tecnología fotovoltaica con buena relación potencia-precio, dentro de unos límites en el coste.

En el caso particular del Paraguay, no existen fabricantes locales de tecnologías fotovoltaicas, por lo que de una forma obligada se debe exportar. El mercado más cercano es el norteamericano, seguido por el europeo y el asiático. Por parámetros de costes y disponibilidad de oferta, la elección se ha decantado por éste último, el cual dispone de productos homologados que cumplen normas de certificación europea.

Son múltiples las opciones en módulos fotovoltaicos, por lo que se han definido los siguientes parámetros que han permitido acotar la búsqueda:

- Tecnología: Monocristalina o Multicristalina
- $V_{mpp} > 25V$
- Densidad energética $> 10Wp/kg$
- Dimensiones aproximadas 1500x1000mm

La argumentación de dichos parámetros es la siguiente:

La tecnología de silicio monocristalino tiene rendimientos superiores al 12%; superiores a otras tecnologías de lámina delgada. Actualmente es una de las más extendidas, lo que permite encontrar dispositivos con buenos niveles de calidad a precios muy competitivos.

⁴⁴ Fuente: elaboración propia

Por la particularidad de que el banco de baterías trabaja a 72V se requieren paneles con un voltaje de salida relativamente elevado, por ello se utilizan módulos con niveles de tensión de salida de punto de máxima potencia que sean superiores a 25V.

El factor del peso en la presente instalación es determinante, ya que su aumento supone mayor calado y mayor resistencia al avance, por lo que dentro de unos límites razonables se debe buscar el tipo de panel con el menor peso posible.

En cuanto a la longitud del panel, tiene que ver con un aspecto puramente geométrico. La forma de la cubierta permite la colocación de tres filas de paneles a lo largo de toda su superficie útil. En la cubierta hay un espacio útil ligeramente superior a 1,5m por lo se ha requerido un modulo de forma rectangular que optimizar el espacio disponible en la cubierta.

Con los parámetros mencionados, se realizó una búsqueda de tecnología dentro del mercado asiático, concretamente en India y China, entre varias alternativas que no se han detallado en el presente desarrollo se ha optado por el siguiente modelo de panel fotovoltaico.


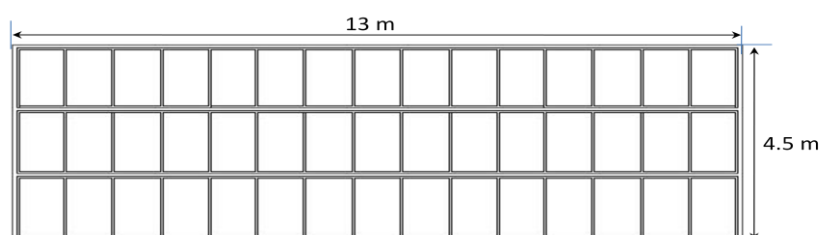
Quanzhou Jinjing Jufeng Energy Trading Co.	
Modelo: JF-SM09(1)	
Tecnología: Monocristalina	
Potencia: 180Wp	
Tensión circuito abierto: 44.01V	
Intensidad cortocircuito: 5.06A	
Tensión máxima potencia: 36.8V	
Intensidad máxima potencia: 4.93A	
Dimensiones: 1580 x 808 x 35mm	
Peso Módulo: 14kg	
Certificación: CEE	

Figura 3.10 - Panel FV JF-SM09⁴⁵

Las dimensiones concretas de este módulo han permitido optimizar la superficie de captación, brindando la posibilidad de instalar cuarenta y cinco paneles fotovoltaicos distribuidos en tres filas de quince módulos cada una, tal como indica la siguiente figura:



La potencia nominal que puede entregar el conjunto de módulos tiene el máximo de 8100Wp.

Dicha potencia dependerá de varios de los factores.

- Radiación solar media de la zona geográfica donde desarrollará su funcionamiento,
- Ángulo con el que incide el sol sobre los paneles, que depende de la hora solar
- Inclinação de los paneles fotovoltaicos respecto a su eje horizontal
- Temperatura a la que estén sometidos los paneles fotovoltaicos
- Eficiencia de los dispositivos que gestionan la energía que aportan dichos paneles
- Perdidas en los conductores que lo conectan con el sistema de acumulación

Varios de estos factores se desarrollarán en los siguientes apartados.

⁴⁵ <http://jufengsolar.en.alibaba.com/>

3.3.2 Conexión de los paneles fotovoltaicos

En el sistema de captación fotovoltaica hay tres inclinaciones distintas, un grupo de paneles con orientación horizontal y dos grupos con la misma inclinación pero con el ángulo contrario, es decir la fila de módulos colocados a babor de la embarcación tienen una inclinación β , y las colocadas en la parte de estribor tienen una inclinación $-\beta$.

Debido a que la embarcación no va a tener una orientación fija si no que irá desplazándose, se va a considerar el global de la superficie de captación con una orientación $\beta=0$, ya que cuando el sol incide perpendicularmente sobre un lado, no lo está haciendo sobre el otro, y viceversa.

En términos eléctricos, es muy importante considerar de qué modo se va a conectar los paneles. Es decir, si se conectan en paralelo tres módulos con diferentes inclinaciones y en consecuencia diferentes tensiones, se provoca una importante pérdida del rendimiento de los paneles, ya que la tensión se iguala al nivel más bajo y en consecuencia potencia más baja.

Por lo tanto, se ha optado por separar las superficies con diferente inclinación utilizando un sistema de seguidores del punto de máxima potencia, trabajando de forma independiente. Así formando una conexión de tipo multicadena que entrega la energía a las baterías de forma descentralizada. En el siguiente esquema se muestra qué tipo de conexión se utilizó.

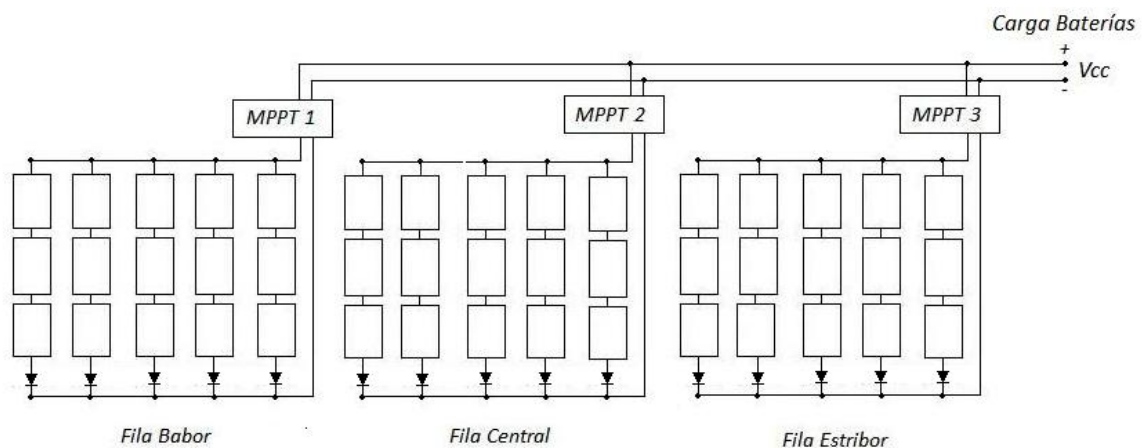


Figura 3.11 - Diagrama de conexión paneles FV ⁴⁶

Ya que la distribución de los paneles sobre la cubierta de la embarcación se dispone en tres inclinaciones distintas. Dichos paneles se han dividido en tres bloques que pueden trabajar a diferentes niveles de tensión e intensidad y en entregar la potencia de forma independiente.

Dentro de cada grupo se han conectado según los requerimientos de voltaje que tendrá la carga en este caso los grupos de baterías. Los tres módulos en serie garantizan niveles de tensión suficientes para cargar dichas baterías que requieren un mínimo de 72V.

De este modo la asociación en serie trabajando a máxima potencia, podrá entregar hasta 100V, por lo que así se garantiza que incluso con niveles de radiación solar más bajos se sigue cargando los grupos de baterías.

⁴⁶ Fuente: Elaboración propia

Con esta configuración, cuando los paneles ubicados en babor reciban una incidencia perpendicular del sol generando a máxima potencia, no se verán afectados por los paneles de la parte de estribor que se encuentren en una posición desfavorable frente a la incidencia del sol, generando un voltaje de salida bajo. De este modo la salida de potencia generalmente se verá compensada independientemente de la orientación de la embarcación.

Se considera esencial la utilización de un seguidor de máxima potencia con el fin de obtener los valores de máxima potencia que puede entregar el sistema de generación fotovoltaica.

3.3.3 Radiación Solar

A partir de las coordenadas geográficas del lugar donde va navegar la embarcación solar, se ha buscado a través de datos que proporciona la web de la NASA⁴⁷ para obtener la radiación solar diaria sobre una superficie horizontal. Dicha zona geográfica corresponde con la ubicación del lago Itaipú, concretamente con la latitud -25,4° y longitud -54,6°.

El resumen de estos datos se muestra en la siguiente gráfica.

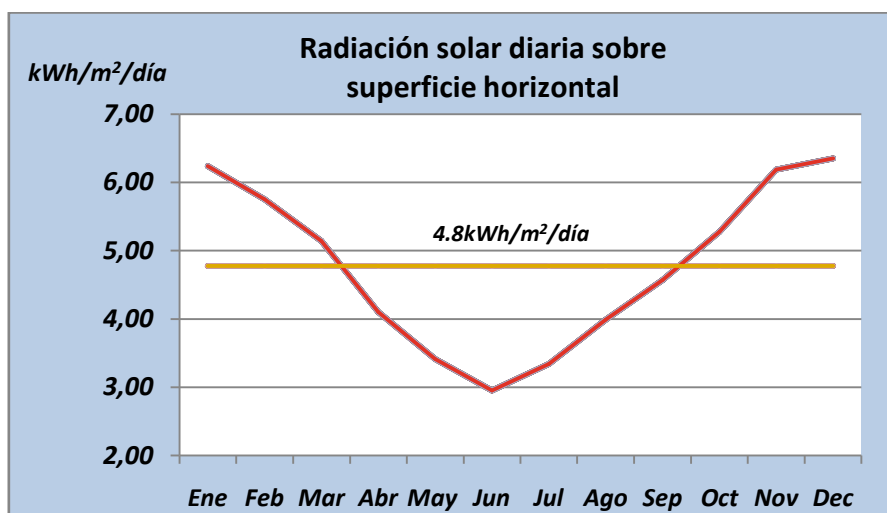


Figura 3.12 - Radiación solar media en localización del proyecto⁴⁸

El periodo de funcionamiento de la embarcación se desarrolla durante todo el año, pero al tratarse de una embarcación turística, su mayor uso tendrá lugar en las estaciones con de buen clima donde generalmente serán tiempos soleados.

Como se observa en el gráfico, el rango de datos varía desde un mínimo de 3kWh para los meses de invierno, llegando a más de 6kWh para los meses de clima soleado. Para el presente cálculo se ha tomado el valor promedio de 4,8kWh/m² día.

Con este dato a partir de la siguiente expresión se puede determinar cuál es el promedio de energía que va a generar el sistema fotovoltaico instalado en la embarcación.

$$E(kWh) = P(kWp) \cdot At_{sol}(h)$$

Donde P, es la potencia nominal en (kWp) del sistema fotovoltaico y At_{sol} , es el equivalente de cantidad de horas al día en las que la radiación solar se mantiene en 1000W/m².

⁴⁷ <http://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/retscreen.cgi?email=rets@nrcan.gc.ca>

⁴⁸ Fuente: Elaboración propia

Aplicando los datos para este caso concreto de 4,8h y 8.1kWp se obtiene la energía producida.

$$E(kWh) = 8,1 \text{ kWp} \cdot 4,8 \text{ h} = 38,8 \text{ kWh}$$

Con este dato, considerando una eficiencia global del sistema del 90% se obtiene un valor aproximado del 35kWh. Sabiendo que la embarcación a máxima potencia está consumiendo 26kW se garantiza una autonomía de 1 hora y 35 minutos. A continuación, se muestran gráficamente otras condiciones de funcionamiento.

En base consumos asociados a diferentes condiciones de funcionamiento de la embarcación, se determina de forma aproximada cual sería su autonomía con un aporte de energía solar fotovoltaica. Considerar que la energía será la acumulada durante un día completo.

Aporte de energía del sistema fotovoltaico/día	35kWh
--	-------

Velocidad Km/h	Sin Carga		Carga al 50%		Carga al 100%	
	Consumo kWh	Tiempo h	Consumo kWh	Tiempo h	Consumo kWh	Tiempo h
8	8,7	4,0	10,9	3,2	13,2	2,7
10	13,5	2,6	17,0	2,1	20,6	1,7
12	19,5	1,8	24,5	1,4	29,6	1,2

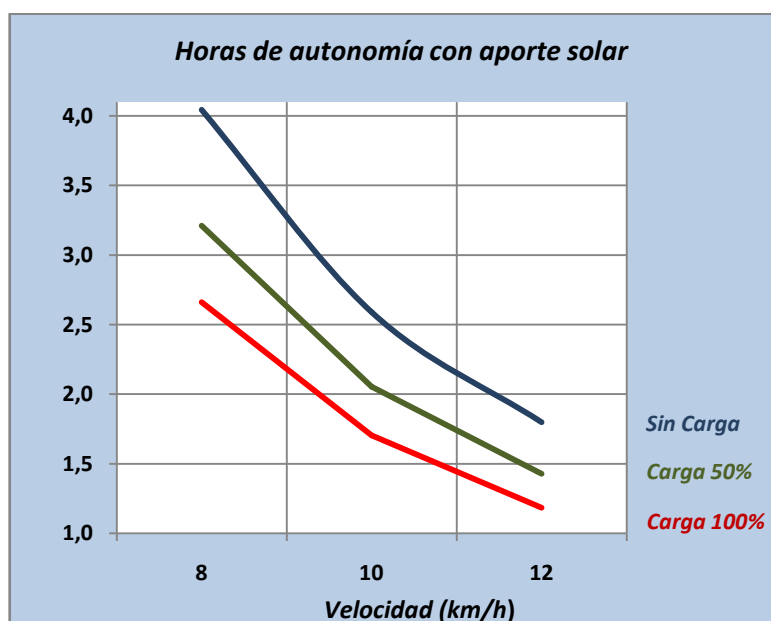


Figura 3.13 - Horas de autonomía del sistema para un valor promedio de radiación solar⁴⁹

Se puede observar como la embarcación sin carga circulando a una velocidad moderada, puede llegar a navegar durante cuatro horas utilizando exclusivamente energía solar. Con pasajeros y más velocidad se dispone de energía para circular una hora y media.

Se va a considerar el promedio de energía por hora que entregará el generador fotovoltaico.

$$E_{solar \text{ hora}} = E_{solar \text{ día}} / T_{captación} = 35kWh / 8h = 4,38 \text{ kW}$$

Donde se ha considerado las horas de mayor incidencia solar de 9.30h de la mañana a 17.30h de la tarde, disponiendo de un periodo diario de captación de aproximadamente 8 horas.

⁴⁹ Fuente: Elaboración propia

El presente análisis de autonomía se ha realizado para niveles de radiación promedios en un rango anual, teniendo información sobre cuanta energía aporta el sistema de generación fotovoltaica a la propulsión de la embarcación; en la ubicación geográfica y bajo ciertas condiciones. A continuación se realiza para niveles máximos de radiación solar.

Aporte solar máximo.

Dentro de los meses de verano como diciembre, existen determinados días con un cielo totalmente despejado donde la radiación solar puede alcanzar niveles de 8,47kWh/m²día.

Este índice de radiación, quiere decir que durante 8,47 horas se está recibiendo el promedio de los 1000kW/m², casi duplicando el valor medio anual. De este modo el aporte del generador solar fotovoltaico, se incrementa considerablemente.

$$E(kWh) = 8,1 \text{ kWp} \cdot 8,47 \text{ h} = \boxed{68,6 \text{ kWh}}$$

Por tanto con un rendimiento del sistema del 90% se dispondrá diariamente de unos 62kWh de energía recibida exclusivamente del sol. Con este valor, las horas de autonomía incrementan considerablemente.

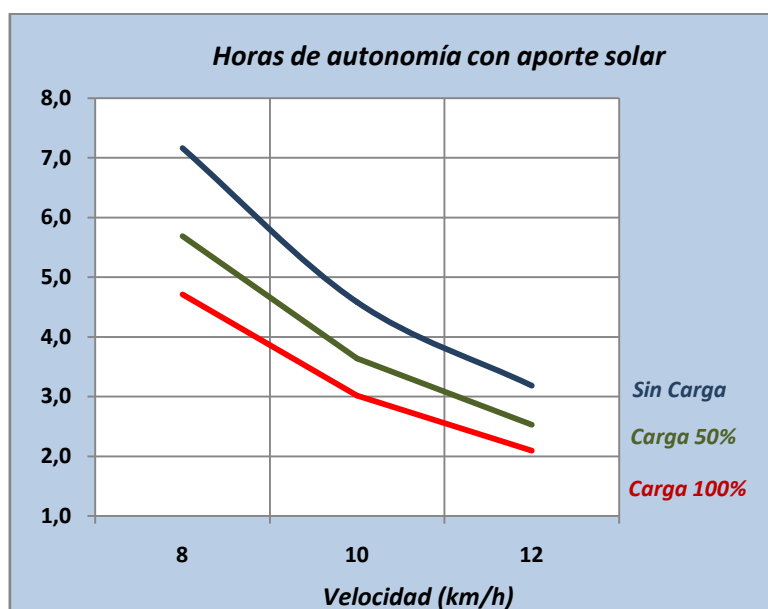


Figura 3.14 - Horas de autonomía del sistema para un valor máximo de radiación solar⁵⁰

Se puede observar como la embarcación con las mismas condiciones de carga y velocidad el cálculo anterior prácticamente duplica la autonomía.

En este caso el promedio de energía por hora también se incrementa. Aunque el periodo de captación, al ser verano se amplía el periodo de captación a 10h.

$$E_{solar \text{ hora}} = E_{solar \text{ día}} / T_{captación} = 62kWh / 10h = \boxed{6,2 \text{ kW}}$$

Este supuesto se considera el aporte solar máximo que recibirá la embarcación, por lo que no será el valor promedio habitual.

El presente análisis, podría ser incluso más detallado considerando la radiación solar de cada mes, o bien la determinación de en qué horas concretas del día existe mayor incidencia del sol.

⁵⁰ Fuente: Elaboración propia

3.4 Almacenamiento y gestión de la energía

A continuación se expone de forma resumida cómo se gestiona la energía de la embarcación, para posteriormente determinar de la capacidad de los acumuladores de energía y que tecnología se va a utilizar.

3.4.1 Procesos de carga

Para entender bien la concepción del grupo de baterías, se va a explicar de forma resumida la matriz energética que sustenta la embarcación. En el siguiente diagrama se muestra de cómo interactúan sus principales elementos.

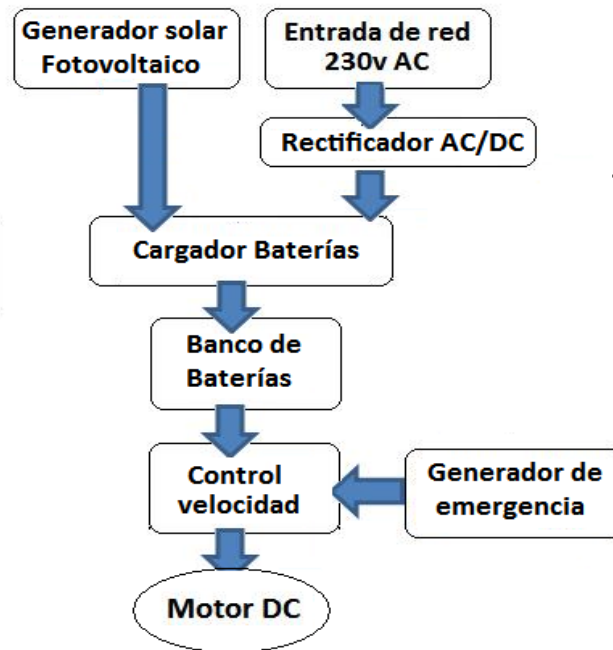


Figura 3.15 - Matriz energética de la embarcación⁵¹

La energía que alimenta las baterías procede exclusivamente de dos fuentes: el generador solar fotovoltaico y la energía procedente de la red eléctrica fija. Siempre que la embarcación se encuentre estacionada en puerto estará conectada a la red cargando el grupo de baterías.

Durante la navegación la energía eléctrica acumulada en los grupos de baterías, se entrega progresivamente al motor para convertirse en la energía mecánica que mueve la embarcación.

Es decir, la embarcación se carga en puerto con la energía de la red eléctrica fija más la aportada por el sistema fotovoltaico. Una vez cargada, sale a navegar y va consumiendo la energía acumulada mientras se va recargando mediante los paneles solares.

Se puntualiza, que cuando la embarcación está navegando la energía se consume a un nivel mucho más elevado del que se recarga, por ellos la necesidad de los bancos de baterías.

Aunque el dimensionado de las baterías está concebido para proporcionar autonomía suficiente al barco, se debe garantizar un aporte de energía auxiliar. En este caso, automáticamente arranca un generador eléctrico de combustión que alimenta directamente el motor y permite que la embarcación pueda regresar a puerto.

⁵¹ Fuente: Elaboración propia

3.4.2 Dimensionado de las baterías

En primer lugar, se va a dimensionar la capacidad de los bancos de baterías que almacenan la energía que la embarcación necesita para propulsarse durante un tiempo determinado.

En la siguiente tabla se han planteado diferentes hipótesis, con una aproximación que determina la capacidad óptima del grupo de baterías en relación al tiempo de autonomía.

	Régimen de trabajo				
	100%	75%	50%		
Motor AM 200 - 13,3 kW					
Potencia Motor (kW)	13,3	9,98	6,7		
Tensión del sistema (V)	72	72	72		
Demandas de capacidad (Ah)					
Teórica (Potencia/Tensión)	184,7	138,5	92,4		
Profundidad descarga 80%	230,9	173,2	115,5		
Considerando η del sistema 90%	256,6	192,4	128,3		

Régimen	V (km/h)
50%	8
75%	10
100%	11 a 12

Capacidad (Ah)	Autonomía (h)			
250	1,0	1,3	1,9	
300	1,2	1,6	2,3	
350	1,4	1,8	2,7	
400	1,6	2,1	3,1	

Promedio a 9km/h = **2,25 horas**

Como se puede observar en la última tabla, el tiempo de autonomía depende de la velocidad de navegación incrementándose de una forma no lineal, sino más bien tipo exponencial. Es decir si circula a 12km/h consumirá más del doble que si lo hace a 8 km/h.

Considerado 9 km/h como la velocidad media de crucero⁵², éste será el valor de referencia para determinar la capacidad de las baterías que pueda garantizar una autonomía de 30 km, que en tiempo supone de 3,33 horas, circulando a dicha velocidad.

Con la energía acumulada en los dos conjuntos de baterías más la fracción solar que aporta el generador fotovoltaico, se debe proporcionar la energía suficiente para circular los 30km de autonomía bajo las condiciones de velocidad y carga mencionadas anteriormente.

Para determinar la capacidad de las baterías se realiza el siguiente cálculo:

En primer lugar se determina el total de energía necesaria para realizar ese trayecto:

$$E_{9 \text{ Km/h}} = \text{Consumo}_{9 \text{ km/h}} \cdot \text{Tiempo Autonomía}$$

$$E_{9 \text{ Km/h}} = 16,65 \text{ kW} \cdot 3,33 \text{ h} = \boxed{55,4 \text{ kWh}}$$

⁵² Ver en especificaciones básicas del apartado 1.4

El siguiente paso, es determinar cuanta energía se recibirá desde el generador solar fotovoltaico durante el trayecto de navegación.

Recordar que la embarcación realizará paseos turísticos y avistamiento de especies, por lo que además del tiempo que está en movimiento se deben sumar las esperas en las que está parada. Este periodo supone un incremento aproximado de 1 hora sobre el tiempo de navegación.

Por lo tanto el tiempo total de captación solar será:

$$Tiempo_{navegación} = Tiempo_{Autonomía} + Tiempo_{Espera} = 4.33 \text{ h}$$

$$E_{solar} = E_{solar \text{ navegación}} \cdot Tiempo_{navegación} = 4,38 \text{ kW} \cdot 4,33 \text{ h} = \boxed{18,95 \text{ kWh}}$$

Por último lugar, con la demanda de energía y el aporte solar se determina la capacidad necesaria de los grupos de baterías.

$$E_{baterías} = E_{g \text{ Km/h}} - E_{solar} = 55,44 \text{ kWh} - 18,95 \text{ kWh} = 36,49 \text{ kWh}$$

$$E_{real \text{ baterías}} = E_{baterías} / Profundidad_{descarga} \cdot \eta_{sistema}$$

$$E_{real \text{ baterías}} = 36,49 / 0,8 \cdot 0,95 = \boxed{48,02 \text{ kWh}}$$

$$Capacidad \text{ baterías} = E_{real \text{ baterías}} / V_{baterías} = 50,82 \text{ kWh} / 72 \text{ v} = \boxed{667 \text{ Ah}}$$

Por tanto la capacidad de energía de cada grupo de baterías para garantizar la autonomía de 30km bajo las condiciones definidas deberá ser al menos 333,5 Ah. Formando un conjunto de elementos que proporcionen una tensión nominal de 72V.

3.4.3 Tipos de baterías

Dentro de los tipos de baterías disponibles previamente expuestos en el apartado de descriptiva de tecnologías se ha optado por los siguientes tipos de baterías.

- Batería Plomo-ácido con celdas convencionales
- Batería Plomo-ácido monoblock
- Batería de Litio Ion

Las primeras de plomo ácido son una opción bastante conservadora, ya que es de uso muy extendido para aplicaciones de acumulación de energía, tanto en instalaciones fotovoltaicas como en sistemas de respaldo de energía como UPS. La segunda tecnología de Litio Ion, tiene características especiales por lo que ha llamado la atención del investigador al ser una opción muy apropiada para el tipo particular de instalación sobre el que se está trabajando.

A continuación se van a plantear las diferentes alternativas con una breve comparativa que destaque sus principales ventajas e inconvenientes.

Tal como se describe en el apartado de estado del arte, la tecnología de plomo ácido ha sido ampliamente probada y actualmente acapara gran parte del panorama de acumuladores estacionarios donde el factor peso no sea un parámetro determinante.

En primer lugar, se han considerado unos factores previos para la selección de la batería:

- Es imprescindible que permita descargas profundas
- Debe ser libre de mantenimiento durante toda su vida útil
- Debe estar sellada, ya que al navegar podría derramar su electrolito

Considerando estos parámetros se han elegido dos posibilidades de acumulador de Pb-Ad.

Plomo ácido modular

El primero es un acumulador de ciclo profundo de plomo ácido con electrolito de gel. El fabricante EXIDE Technologies⁵³ dispone de baterías estacionarias de celdas de 2V con ciertas variaciones que disminuyen su peso un 10% respecto a las utilizadas en instalaciones fijas. A continuación se muestran sus principales características.

El modelo *EPzV 360*, cumple con los requisitos de potencia que demanda la embarcación.

Type 120 Ah*	Weight**	Length (l)
Height (h1) 672 mm	kg	mm
Height (h2) 704 mm		
2 EPzV 240	240	17.4
3 EPzV 360	360	25.1
4 EPzV 480	480	32.9
5 EPzV 600	600	40.6
6 EPzV 720	720	48.3

Figura 3.16 - *EPzV 360*⁵⁴

El valor de capacidad nominal C_5 , indica que tolera velocidades de descarga altas sin comprometer su capacidad, parámetro imprescindible para el tipo de descarga a la que se van a someter de una forma continua el conjunto de baterías.

Es prácticamente igual a cualquier batería estacionaria fija, ya que tolera descargas del 80% sin comprometer su vida útil. Sobre este último parámetro el fabricante garantiza los 1200 ciclos de carga/descarga.

En general se considera un acumulador bastante equilibrado en cuanto a prestaciones, peso y vida útil. No obstante no es una selección demasiado ambiciosa ya que siguen siendo muy pesados si se considera que forman parte de una instalación que se debe moverse.

Plomo ácido monoblock

El mismo fabricante *EXIDE* dispone de un producto clasificado como “motive power”. El concepto de funcionamiento es el mismo que la de tipo estacionario pero se agrupan varias celdas de 2V en módulos, mejoran relación de densidad energética de la batería.

Es un acumulador de tipo monoblock, con tensión nominal de 6 y de 12V. Entre ellos se optó por la siguiente gama, por su tolerancia a descargas profundas sin comprometer su vida útil.

Type	Nominal voltage V	Nominal capacity C_5 (30 °C) Ah	Nominal capacity C_{20} (30 °C) Ah	Length (l) max. mm	Width (b/w) max. mm	Height (h) max. mm	Weight kg
GF 06 160 V 1	6	160	196	244	190	275	29.0
GF 06 160 V 2	6	160	196	264	183	270	33.0
GF 06 180 V	6	180	200	244	190	275	31.0
GF 06 180 V Q	6	180	200	244	190	282	31.5

Figura 3.17 - Batería monoblock -*GF 06 180 V*⁵⁵

^{53,52,53} Fuente: <http://www.industrialenergy.exide.com/>

Su principal ventaja es su bajo peso en relación a la energía que puede entregar, siendo hasta un 40% más ligero que un elemento de 2V. Muy conveniente para la aplicaciones móviles.

Por el contrario, tiene el inconveniente de que su vida útil es relativamente corta. Ya que se limita a los 700 ciclos de carga para profundidades de descarga de 75%.

En resumen, es un tipo de acumulador muy adecuado para el tipo de aplicación que se está desarrollando, con la única desventaja de su corta vida útil. Algo que puede comprometer su viabilidad económica.

Litio ion

Es una tecnología más innovadora, siendo una excelente opción para vehículos eléctricos debido a su alta densidad energética. Al utilizar aleaciones de metales más ligeros, se consiguen relaciones energía/peso que cuadriplicar las de los acumuladores de plomo ácido.

Además del factor peso posee las siguientes ventajas:

- Entrega la energía con unos niveles de descarga muy lineales, independientemente del estado de carga de la batería
- Tiene una vida útil mayor, soportando ciclos de descarga profunda
- En términos de tensión, genera un 60% que las de Pb-Ad

Estos motivos y los comentados en apartado de descriptiva⁵⁶, se considera un argumento suficiente para contemplarla como la mejor opción del diseño.

El fabricante oriental *thunder-sky lithium batteries*⁵⁷ dispone de una amplísima gama de acumuladores que utilizan esta tecnología. Aportando soluciones desde pequeños vehículos hasta autobuses urbanos de propulsión eléctrica.

El modelo elegido tiene las siguientes características:

TS-LFP Series - Modelo TS-LFP400AHA
Rangos de tensión: 2.5-4.2V
Tensión Nominal. 3.2V
Capacidad Nominal: 400Ah
Intensidad máxima de descarga (continua): 800A
Intensidad máxima de descarga (pico): 2000A
Intensidad máxima de carga: 120A
Tiempo de carga completa: 4 horas
Vida útil (80%PD): 2000
Vida útil (70%PD): 3000
Peso (Kg): 13kg +/- 160g
Densidad energética: 99 Wh/Kg
Nivel de autodescarga: << 3% mensual

Se destaca su alto nivel de entrega de potencia (800A) y el rápido tiempo de carga.

⁵⁶ Ver tabla comparativa en apartado 2.3.3 – Figura 2.13

⁵⁷ Fuente: <http://www.thunder-sky.com>

Pero sin duda los argumentos que destacan este tipo de batería, son su vida útil del doble al triple según la descarga, y su excelente relación de densidad energética.

En la siguiente figura se puede observar su gráfica característica. Donde el proceso de descarga es totalmente lineal dentro de los niveles de voltaje nominal de 3,2V.

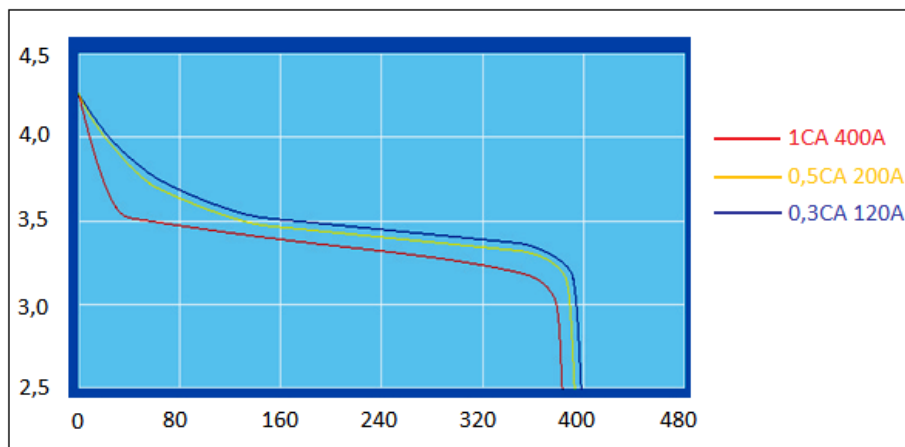


Figura 3.18 - Gráfica descarga batería – Temperatura de 25°C⁵⁸

3.4.4 Determinación del tipo de batería

A continuación se muestra una tabla comparativa que resume las características de las tres alternativas propuestas.

	Pb acido Modular	Pb acido Monoblock	Litio Ion
Densidad energética (Wh/kg)	34	28	99
Vida útil (80% PD)	1200	700	2000
Vida útil (70% PD)	NA	NA	3000
Nivel de autodescarga	3% - 10%	3% - 10%	3%
Tiempo de carga	5 - 10h	5 - 10h	4h

Realizar un análisis completo de cada una de las tecnologías requiere un recurso de tiempo del que no se dispone, pero existen dos parámetros que hacen la batería de Litio-Ion como la más idónea, su densidad energética y su larga vida útil.

El gran inconveniente de la batería de Li-Ion es la inversión inicial, que comparada con tecnologías como la de plomo es notablemente mayor. Con ello, no implica que su coste de amortización sea tan elevado, ya que al tener mayor vida útil su coste en el tiempo se atenúa considerablemente.

En conclusión, se van a dejar abiertas las dos alternativas:

- Plomo ácido Modular - Modelo *EPzV 360Ah* , 2V
- Litio Ion - Modelo *TS-LFP400AHA* – 3.2V

Dejando la tecnología de litio como la elección más adecuada para el grupo de baterías que alimentan la embarcación solar. Sin embargo, la última instancia, la tendrá el promotor de la embarcación, ya que vendrá condicionada por el capital inicial del que disponga.

⁵⁸ Fuente: <http://www.thunder-sky.com/pdf/TS-LFP400.pdf>

4. Consideraciones ambientales y económicas

4.1 Consideraciones ambientales

A pesar de que el presente proyecto está concebido bajo unas premisas basadas en el respeto hacia el medio, como toda actividad humana tiene un impacto sobre el medioambiente.

Evaluar dicho impacto de una forma exhaustiva supondría un estudio que requiere de una fase de recopilación de datos, clasificación y posterior evaluación de todos los factores que afectan de algún modo al ecosistema.

Por lo tanto de un modo resumido se va a enumerar como va a afectar a su entorno.

4.1.1 Factores de impacto

La embarcación navegará sobre el Lago Itaipú que en realidad es en una represa artificial construida sobre el cauce del río Paraná, macro-espacio concebido para la generación de energía a gran escala, algo que modificó por completo la biodiversidad de su entorno.

Aunque tal vez resulte contradictorio, actualmente es un área considerada como reserva natural, por este motivo es importante priorizar sobre la preservación del nuevo medio natural que fue creado por las circunstancias ya mencionadas.

Los factores se van a clasificar en dos tipos: directos e indirectos. Los primeros son aquellos que causan alguna alteración sobre el medio de forma directa y los segundos son los que han sido ocasionados por la fabricación de los materiales y elementos que componen la embarcación.

Factores directos

Esencialmente son los impactos causados por la navegación de la embarcación se clasifican de mayor a menor impacto.

- **Generador de emergencia.** En contadas ocasiones en las que la radiación solar no alcance unos niveles mínimos y la embarcación pueda quedarse sin energía se utilizará un generador diesel que emitirá gases como el CO₂ y NO_x además de las emisiones acústicas.
- **Motor eléctrico.** Aunque comparado con motores de combustión su nivel sonoro es muy inferior, siempre produce algún tipo de perturbación acústica tal vez no perceptible por el ser humano, pero si por la fauna que habita la represa.
- **Navegación de la embarcación.** Por muy bajo que sea el impacto, es un elemento artificial que puede irrumpir la actividad natural de ciertas especies.

Factores indirectos

- **Embarcadero e infraestructuras.** Se ha creado un espacio artificial dentro de un espacio natural, que por menor que sea ha requerido un conjunto de operaciones que alteran en mayor o menor grado a su entorno.
- **Fabricación de la estructura de la embarcación.** Se ha utilizado una determinada cantidad de aluminio para construir el casco y las estructuras de la embarcación.

- Placas fotovoltaicas. Se ha necesitado una considerable cantidad de minerales para fabricarlas, con las consecuencias que implica dicha extracción. Además existe un consumo energético del proceso asociado a su fabricación.
- Baterías. Los acumuladores de energía eléctrica se componen de metales pesados y compuestos químicos que pueden resultar perjudiciales si no se les da un tratamiento o reciclaje adecuado en su proceso de sustitución.
- Otros elementos. Para la adquisición gran parte de los elementos ha sido necesaria la importación desde regiones alejadas, para algunos de ellos desde otro continente. Por lo que también se debe con las emisiones asociadas a dicho transporte.

4.1.2 Ahorro de emisiones de CO₂

La embarcación dispone de dos propulsores eléctricos que sustituyen a lo que habitualmente sería un motor de combustión de diesel o gasolina. Por lo que se va a estimar el ahorro de emisiones asociadas a lo que supondría utilizar un motor de combustión.

En primer lugar se tiene en cuenta el tipo de motor equivalente para uno de combustión.

La embarcación tiene dos propulsores eléctricos con un total de 26,6kW, dichos motores tienen un rendimiento del 90%. Si un motor de diesel tiene un rendimiento aproximado del 45% por lo que la potencia que debería tener sería la siguiente.

$$P_{diesel} = P_{eléctrico} \cdot \eta_{eléctrico} / \eta_{diesel} = 26,6 \cdot 0,9 / 0,45 = \boxed{53,5kW}$$

Tomando de referencia la distancia recorrida en el periodo de autonomía de 30km, las emisiones producidas por un motor diesel de esas características supondría:

Potencia del vehículo: 73CV - 53,5kW
Tipo de Combustible: Diesel
Consumo medio combustible: 10 litros/100km

Total Litros consumidos	kg de CO ₂ / l diesel	kg CO ₂ Emitidos
3	2,6	7,8

Por lo tanto, para cada paseo que realice la embarcación recorriendo una distancia de 30km supone un ahorro de emisiones de 7,8 kg de CO₂.

4.2 Consideraciones económicas

Se ha definido el siguiente presupuesto que engloba de forma general los costes de la embarcación.

Categoría	Elemento	Unitario	Cantidad	Total
Equipamiento energético	Paneles Solares	260 €	45	11.700 €
	Seguidor MPPT	600 €	3	1.800 €
	Baterías Pb-Ad	150 €	72	10.800 €
	Baterías Li-Ion	530 €	46	24.380 €
	Cargador Baterías	1.500 €	2	3.000 €
	Grupo propulsor	6.100 €	2	12.200 €
	Cableado	600 €	1	600 €
	Generador auxiliar	1.800 €	2	3.600 €
Estructura de la embarcación	Casco de la embarcación Material: aluminio	4.500 €	2	9.000 €
	Superestructura embarcación Material: aluminio	6.000 €	1	6.000 €
Sistemas transmisión/navegación	Eje unión motor - hélice	2.000 €	1	2.000 €
Total alternativa 1 - Utilizando Batería Pb-Ad EPzV 360Ah				60.700 €
Total alternativa 2 - Utilizando Batería Li-Ion TS-LFP400AHA				74.280 €

El resultado de los precios muestra una diferencia de 13.580€ entre los dos modelos de baterías. Lo que supone un incremento del 18% del coste total del barco.

Ahora bien, para analizar el coste real de la batería durante toda su vida útil, se debe determinar cuál es el coste por ciclo de vida.

Tipo de batería	Precio Baterías	Ciclos de vida	Coste €/Ciclo
Batería Pb-Ad EPzV 360Ah	10800	1200	9
Batería Li-Ion TS-LFP400AHA	24380	2000	12,2
Diferencia según inversión inicial	13580	Diferencia con amortización	3,2

Con estos resultados se puede apreciar como el incremento real durante todo el ciclo de vida por la utilización de baterías de litio se ve notablemente favorecido por su mayor vida útil.

Si se concibe la batería en función de los ciclos de vida, la de tipo Pb-Ad tendría el siguiente coste económico:

$$\text{Coste} = \text{Coste } \text{€/ciclo} \cdot 2000 \text{ ciclos} = 18000\text{€}$$

Por lo tanto, el incremento real del coste utilizando un grupo de baterías con tecnología Li Ion, supone un 8% de la inversión total de la instalación.

Con esto se dispone de un dato objetivo para la futura determinación del grupo de baterías cuando se utilice como criterio de selección el coste económico.

5.Conclusiones

Las conclusiones que se pueden extraer al finalizar este proyecto, se pueden enmarcar en diversos ámbitos.

- La finalidad del presente proyecto está más allá del desarrollo en sí de una embarcación que realiza paseos turísticos, sino que el aporte más significativo es la creación de una herramienta de divulgación de las energías renovables. En el caso concreto de esta aplicación se mostrará al visitante de una forma muy gráfica como la energía solar fotovoltaica es una realidad, ya que es capaz de aportar energía suficiente para navegar.
- En países como Paraguay, donde toda la energía eléctrica procede de generación hidroeléctrica y el coste de dicha energía es relativamente bajo, la utilización de embarcaciones propulsadas con este tipo de energía, se puede considerar como algo muy positivo, tanto desde un punto de vista medioambiental como económico.
- Durante los meses de verano, la mitad de la energía que la embarcación necesita se recibe del sol mientras se está navegando y el resto se obtiene del remanente de energía acumulado en las baterías durante el resto del día. Esto quiere decir que el aporte solar cubre el 100% de la demanda, sin necesidad de ninguna fuente de energía externa. En cambio, para meses con índices de radiación más bajos no será suficiente con energía solar, necesitando una recarga previa desde la red eléctrica.
- Para el sistema de acumulación de energía se han tenido en cuenta factores como el peso, normalmente no considerados para instalaciones fijas. Esta circunstancia ha requerido ir *más allá* en la investigación y con ello considerar tecnologías más innovadoras. Dentro de las alternativas planteadas, la tecnología de Litio-Ion es sin duda la mejor solución para las necesidades del presente proyecto, debido a su óptima relación potencia/peso y número de ciclos de carga que determinan su vida útil.
- Aunque el diseño naval puede parecer algo que tenga poca relación con energías renovables se puede plantear lo siguiente. Con el desarrollo del presente proyecto se ha descubierto que consideraciones como la tecnología de fabricación, la forma, o tipo de materiales con los que se construye una embarcación, variar en gran medida su demanda de energía para poder navegar. Por lo que plantear el diseño de un tipo de embarcación que prime por la optimización de energía, puede suponer un importante ahorro en el consumo de recursos, tales como los combustibles fósiles.

A continuación se incluye una breve reflexión del autor sobre su experiencia personal durante el periodo de desarrollo del presente proyecto.

Reflexión sobre el viaje

“La Utopía supone una crítica del orden existente, siendo su finalidad cuestionarlo a través del proyecto alternativo que propone... proyecto utópico cuyos dos ingredientes básicos son el espacio y el tiempo, es decir, un territorio donde fundarse y una historia con un pasado a recuperar o un futuro donde proyectarse”

Gabriel García Márquez

Siempre he considerado que viajar te permite conocer en primera persona otras realidades muy diferentes a las que se está acostumbrado, siendo una de las experiencias más enriquecedoras para un individuo. Tener la suerte de poder vivir dentro de ellas, te permite entender que pese a tener diferentes culturas, diferentes culturas, diferentes máscaras, todas la personas somos iguales, humanos.

Poder viajar a Paraguay ha permitido descubrir, que no solo aquí hay un interés por mejorar el trato que se le da a nuestro entorno, dejando una puerta abierta hacia la esperanza de un cambio necesario sobre la concepción de los recursos naturales.

Lo cierto, es que podría enumerar infinidad de situaciones hasta aburrir al lector...

Concluyo en que la oportunidad que se me ha ofrecido de poder realizar este proyecto en otro continente donde la realidad es bien distinta al nuestro, es un aporte *impagable*...

Carlos Jiménez Lao

6. Bibliografía y referencias

Bibliografía de consulta

Cálculo y diseño naval

- **Basic Ship theory.** K.J. Rawson, E.C. Tupper. Butterworth–Heinemann. 5th ed. 2001

Sistemas de energía solar fotovoltaica

- **Understanding Batteries.** Ronald M.Dell, David A.J.Rand. RSC Paperbacks. Royal Society of Chemistry 1st ed. 2001.
- **Máster en energía para el desarrollo sostenible. Módulo 5. Energía solar Fotovoltaica.** Cátedra Unesco Universidad Politécnica de Cataluña. 3ª Edición. 2008.
- **Energía Solar.** Carlos Castellano. Escuela Politécnica Nacional. Edición 2009
- **Solar electricity.** Tomas Markvart .John Wiley & Sons, cop. 2nd ed. 2000.
- **Solar Cells: Materials, Manufacture and Operation.** T. Markvart, Luis Castañer. Elsevier Advanced Technology, 2005

Motores eléctricos y regulación de motores

- **Máster en energía para el desarrollo sostenible. Módulo 6. Energía eólica. Capítulo C Sistemas mecánicos, eléctricos y electrónicos.** Cátedra Unesco Universidad Politécnica de Cataluña. 3ª Edición. 2008.

Páginas web de consulta

Cálculo y diseño naval

- <http://www.fondear.org>
- <http://www.hermann-heinrich.net/foto/bau/index.htm>
- http://www.solarnavigator.net/solar_boat_member_links.htm
- <http://www.solarwaterworld.de/>
- <http://www.energyprofi.com/jo/Elektro-und-Solarschiffe-2000-bis-2006.html>
- <http://www.kopf-solarschiff.de/index.php?id=4&L=1>

Sistemas de energía solar fotovoltaica

- <http://www.batteryuniversity.com>
- <http://saftbatbatteries.com>
- <http://www.ukai.com>
- <http://www.soltermia.org>

Motores eléctricos y regulación de motores

- <http://www.aquawatt.at/index.php>
- <http://www.asmomarine.com/>
- <http://www.bellmann.nu/>